経済産業省 御中

平成 25 年度新エネルギー等導入促進基礎調査
新発電技術を用いた発電設備に係る安全性確認調査
報告書

平成 26 年 3 月

株式会社三菱総合研究所

はじめに

原子力発電の停止の長期化や再生可能エネルギーに関する導入機運の高まりに伴い、風力・太陽電池といった従来の新エネルギーに加え、潮流発電、波力発電、熱電発電、床発電等、新たな技術による発電方式を用いた発電設備の実用化が進められている。

電気事業法においては、新たな発電設備を設置する際には、事業用電気工作物として、各設備の設置時に工事計画の認可など各種安全規制が課されている。近年では、潮流発電、熱電発電に係る設備が工事計画の認可を経て設置されており、今後これらの新発電方式を用いた発電設備の普及がさらに進むことが予想される。また、その他の新発電設備や、同じ発電方式であっても、施設形態の異なる設備の具体的な設置の検討も各方面で進められている。

本事業では、これらの新たな発電技術について、その原理、想定される様々な設備及び施設形態毎に対応したリスク評価、当該リスク評価を踏まえた安全基準の検討等を行い、今後の電気事業法令上の効果的かつ効率的な安全規制の取り扱いについて整理・分析することを目的とする。

目次

はじめに ..... **i**

1. 調査方法 **1**

1.1 調査対象・内容 1

1.2 検討手順 1

1.3 検討体制 2

1.4 検討手法 4

1.4.1 想定されるハザードの抽出 4

1.4.2 リスク評価手法 5

1.4.3 安全対策の立案 9

2. 潮流発電・波力発電 **11**

2.1 国内外の技術開発および安全規制にかかる動向 11

2.1.1 潮流発電・波力発電の技術開発・導入普及状況及び今後の見通し 11

2.1.2 潮流発電・波力発電に係る規格、安全規制を中心とした動向調査 27

2.2 リスク評価と安全基準の検討 52

2.2.1 検討の基本的方針 52

2.2.2 メーカー・事業者へのヒアリング調査結果 57

2.2.3 想定されるリスクと安全対策の整理 60

2.2.4 リスク評価および安全基準の検討に係る留意事項 66

3. 熱電発電 **71**

3.1 国内外の技術動向 71

3.1.1 熱電発電の原理と特徴 71

3.1.2 熱電発電の適用例 74

3.1.3 熱電発電利用の今後の動向 80

3.2 リスク評価と安全基準の検討 82

3.2.1 想定されるリスクと安全対策の整理 82

3.2.2 主なハザードと安全対策 83

3.2.3 リスク評価および安全基準の検討の係る留意事項 89

4. 床発電 **90**

4.1 国内外の技術動向 90

4.1.1 圧電式タイプの床発電システム 90

4.1.2 機械式タイプの床発電システム 94

4.1.3 床発電利用の今後の動向 97

4.2 リスク評価と安全基準の検討 97

4.2.1 想定されるリスクと安全対策の整理 97

4.2.2 主なハザードと安全対策 98

参考文献 **104**

1. 調査方法

1.1 調査対象・内容

本事業では、国内外における以下の新発電技術を対象とする。

- 潮流発電
- 波力発電
- 熱電発電
- 床発電

上記の新発電技術に関して、以下の調査と検討を行う。

① 国内外における新発電技術に係る安全規制を中心とした動向調査
② 新発電技術に係る電気事業法に基づく技術基準を中心とした安全規制の検討

1.2 検討手順

本事業では、対象とする新発電技術が有するリスクに対し、実施すべき安全対策、および安全対策を実現するための安全基準を検討することが求められる。そのためには、対象技術が有するリスクを確実に把握することが重要であると考えられる。

経済産業省では、平成 21 年度に実施された、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会における小型発電設備規制検討ワーキンググループにおいて、これまで利用されていなかったエネルギーを活用する小型発電設備に対する電気事業法の保安規制の在り方について検討を行っている。同ワーキンググループでは、小型水力発電設備、および小型汽力発電設備が検討対象であったが、同ワーキンググループでの検討を一種のケーススタディと捉え、他の設備に関する規制の在り方を検討する際に活用できるような、より一般的な「検討の進め方のモデル」を示すことを目的としており、図 1-1 に示す小型発電設備の規制の見直し検討手順が提示されている。

この手順においては、安全基準の検討にあたり、まず想定されるリスクを把握した上で、リスクを顕在化させないための安全対策を検討する手順がとられている。この基本的な検討の流れは、「検討対象とした発電設備に固有の特徴に依存したものではなく、今後新たな発電設備の保安規制の在り方を検討する際にも適用することが可能と考えられる」とされている。

本事業における検討の手順に関しても、基本的にこの流れを適用する。ただし、本事業の対象技術は、国内における導入事例が極めて少ない新発電設備であるため、発電設備固有の現行規制は存在しない。従って、今年度の主な検討範囲としては、図 1-1 における「3. リスクの識別・評価と安全対策の整理」の段階までを重点的に実施することとする。

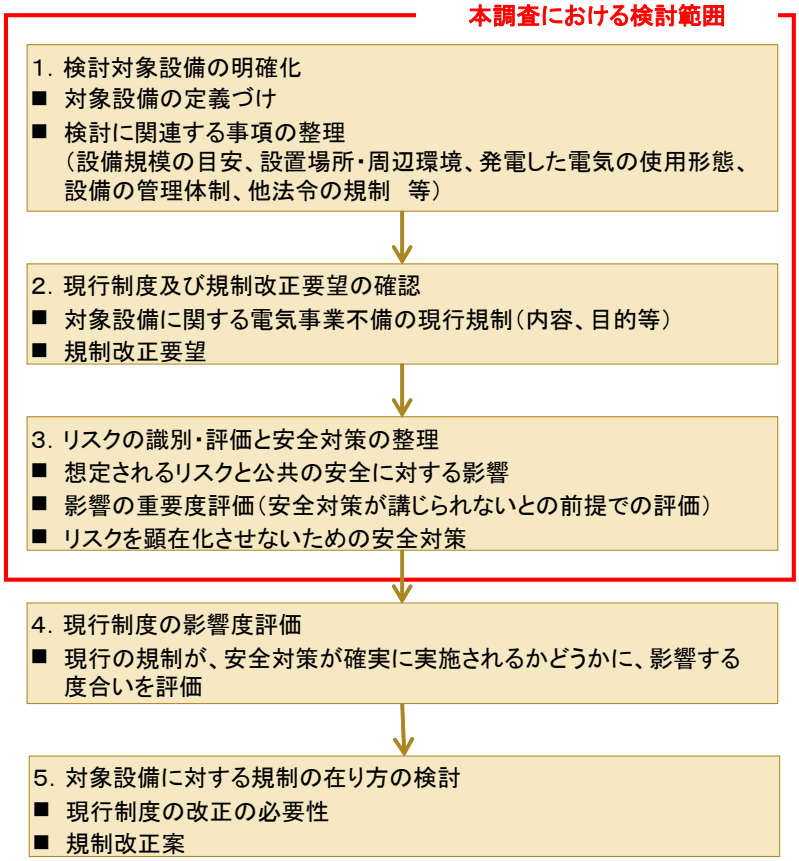


図 1-1　小型発電設備の規制の見直し検討手順

出所）「小型発電設備規制検討ワーキンググループ報告書」（平成 22 年，経済産業省）[1-1]より作成

1.3　検討体制

検討にあたっては、対象とする新発電技術に関する技術的知見を有する複数名の有識者等により構成した「新発電技術を用いた発電設備に係る安全性検討委員会」を設置し検討を実施した。

表 1-1 に本委員会の構成を示す。

潮流発電・波力発電に関しては、以下に示す 3 回の委員会を開催して検討を実施し、検討結果をハザード分析表としてとりまとめた。

- 第 1 回　平成 26 年 1 月 31 日
- 第 2 回　平成 26 年 2 月 28 日
- 第 3 回　平成 26 年 3 月 19 日

熱電発電、床発電については、書類審査による審議により検討を実施した。

表 1-1 新発電技術を用いた発電設備に係る安全性検討委員会（50 音順）

委員（海洋発電）

氏名	所属
伊藤正治	独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部　主任研究員
井上俊司	独立行政法人海上技術安全研究所　洋上再生エネルギー開発系長
木下健（委員長）	東京大学名誉教授
経塚雄策	九州大学大学院総合理工学研究院教授
高木健	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
高野裕文	一般財団法人日本海事協会　業務執行委員
永田修一	佐賀大学教授／佐賀大学海洋エネルギー研究センター長

委員（熱電発電）

氏名	所属
海部宏昌	株式会社 KELK　熱電発電事業推進室　主幹
梶川武信	湘南工科大学　名誉教授
山本淳	独立行政法人産業技術総合研究所　エネルギー技術研究部門 熱電変換グループ　グループ長

委員（床発電）

氏名	所属
小林三昭	ジェイアール東日本コンサツタンツ　株式会社 理事　ICT 事業本部　部長
鷹野健太郎	株式会社アサボウ　代表取締役

1.4　検討手法

本調査の重点検討項目である、リスクの識別・評価と安全対策の整理の手順として、以下の 3 段階に分けて考えた。

- 想定されるハザードの抽出
- リスク評価（各ハザードがもたらす危害の重大性、発生頻度評価）
- 安全対策の立案

発電技術が有するリスクの評価は、発電方式や設置・メンテナンス・撤去方法など、発電装置の特性により異なるものと考えられる。本調査において対象とする新発電技術においては、まだ発電方式や装置の構造が定まっていないものが多く、また実証実験段階、運用段階でその規模も異なる。そこで本調査では、装置の構造が具体的に想定される熱電発電および床発電に関してはリスク評価を行うものの、装置の構造が多種に渡る潮流発電・波力発電に関してはリスク評価手法の提案のみにとどめることとし、リスク評価自体は次年度以降の課題とした。

1.4.1　想定されるハザードの抽出

想定されるハザードの抽出は、主に、各発電設備の設置時、運用時を中心に想定し、想定すべき「ハザード（危険状況）」および「危害の対象」を網羅的に整理した。ハザードの整理にあたっては、技術動向や安全規制動向の調査結果に加え、委員会や有識者のヒアリングを情報源とした。

(1) ハザードの特定

米国 DOD（Department of Defense）が調達に際して使うシステム安全性に係る規格である MIL-STD-882C では、ハザードの定義を SMO（Source、Mechanism、Outcome）に分けて考えることが提唱されている。つまり、危険源そのものをハザードとするのではなく、それが危害を引き起こすメカニズムを想定し、それらをすべて踏まえたうえでハザードとする考え方である。SMO とは、それぞれ以下のものである。

Source	：事故をもたらす源
Mechanism	：危険状態（人、財産、環境が Source にさらされる状況、事故につながるまでの動作）
Outcome	：Mechanism の結果として引き起こされる事象

本調査では上記に倣い、ソース（発生源）、可能性のある事象、可能性のある危害、に分けてハザードを特定する方針とした。

その際、新発電技術は技術面・制度面で多くの不確実性を有することから、技術の差異、技術開発段階（発電設備の大きさや系統連系の有無等）や、電気事業法の規制範囲等は考慮せず、想定されうるハザードを網羅的に洗い出すことに注力した。発電技術の違いや、実証実験段階と商用運転段階の規模の違い、系統連系の有無等は、リスク評価（後述）の段階で

表現される。

(2) 危害の対象

欧州の民間認証機関である GL（Germanischer Lloyd、後述）では、認証を行う上での基礎として、「人命」「構造体」「環境」の安全性を掲げている[1-2]。本調査においても、ハザードがもたらす危害の対象として、以下の 3 つを考慮することとした。なお、財物には装置自身のみならず、外部の財物も含めることとする。

- 人への危害
- 財物への危害
- 環境への危害

1.4.2　リスク評価手法

国際的に、ハザードに対するリスク評価は、ISO/TR 14121-2:2007、ISO13849-1：2006 及び EN ISO 13849-1 にて示されている手法を用いるのが一般的となっている。

代表的なリスク評価手法として、リスクマトリックス手法とリスクグラフ法が挙げられる。いずれの方法も、リスクパラメータの定義と評価を行い、そのリスクパラメータの評価に基づくリスク等級の判定を行う、というプロセスで行われる。

(1) 主な手法の紹介

1) リスクマトリックス法

リスクマトリックス法は、「危害の程度」×「事象の発生確率」として 2 次元のリスクマトリックスを用いる手法である。リスクパラメータである「危害の程度」と「事象の発生確率」を複数区分に分け、2 つの交点でリスク等級を指定する。

図 1-2 に、欧州の認証機関の一つである DNV（Det Norske Veritas）の技術評価基準のガイドライン中に紹介されているリスクマトリックスの例を示す。色の濃い部分に該当するものが、リスク等級が高く、対策立案の際に優先順位が高いことを意味している。

危害の発生確率

危害の程度 (Increasing severity)	Increasing likelihood 1	2	3	4	5
1	L	L	L	M	M
2	L	L	M	M	M
3	L	M	M	M	H
4	M	M	M	H	H
5	M	M	H	H	H

図 1-2　リスクマトリックスの例
出所）Technology Qualification（DNV,2013）[1-3] より三菱総合研究所作成

2）リスクグラフ法

リスクグラフ法は、それぞれのリスクパラメータを基本的には二者択一で評価し、リスクを見積もる手法である。機械設備に対するリスク評価手法についても、ISO/TR 14121-2:2007、ISO13849-1：2006 及び JIS B 9705-1:2000 に基づく「リスクグラフ」を用いたリスク評価方法が厚生労働省より提示されている。

具体的には、図 1-3 に示す通り、リスクマトリックスにおける「危害の発生確率」を、「暴露の頻度」「事象の発生確率」「回避の失敗確率」に分割して考える。リスクパラメータについては、以上の 3 項目に「危害の程度」を加え、4 つの項目に分けて定義される（表 1-2）。それぞれの項目に対し、基本的には 2 段階（事象の発生確率のみ 3 段階）の評価尺度を持たせる。

図 1-4 にリスクグラフの概念図を示す。

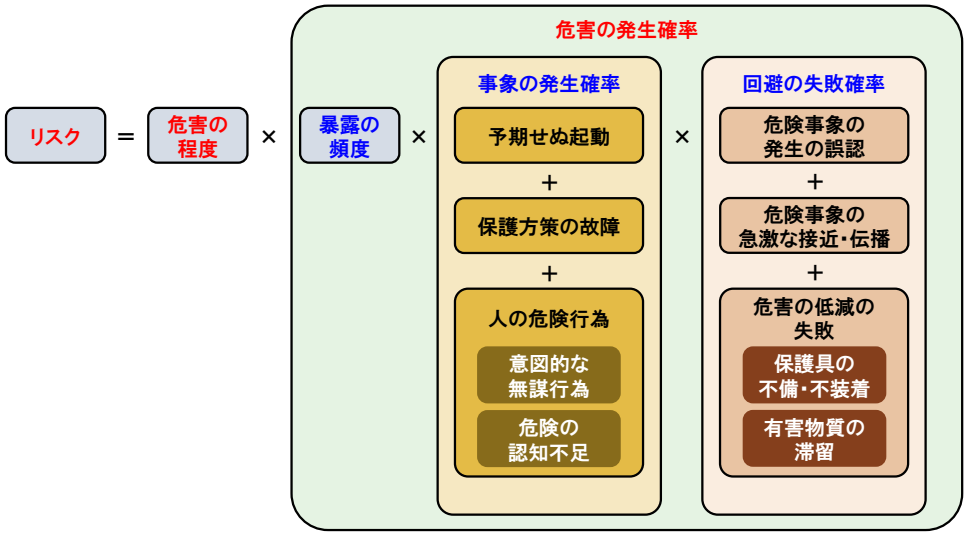


図 1-3　リスクグラフ法の前提となるリスクの概念

表 1-2　リスクグラフ法におけるリスクパラメータ（評価尺度）

リスクパラメータ	評価尺度
危害の程度	S1　軽度
	S2　重度
暴露頻度	F1　稀
	F2　頻繁
回避可能性	A1　可
	A2　不可
事象の発生確率	O1　高
	O2　中
	O3　低

出所）ISO/TR 14121-2 [1-4] をもとに三菱総合研究所作成

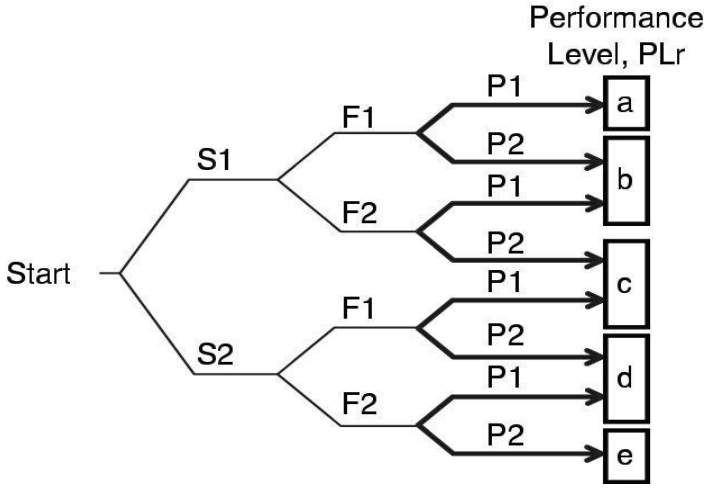


図 1-4　EN ISO 13849-1 で示されているリスクグラフの例

出所）Allen Bradley 社[1-5]

(2) 新発電技術を用いた設備に対するリスク評価手法の提案

本調査で対象とする新発電技術を用いた設備のリスク評価には、リスクグラフ法を用いることを推奨する。メリットとしては以下のものがあげられる。

【リスクグラフ法を用いる主なメリット】

- まだ実例のない段階の製品・プロジェクトの評価においては、二者択一で簡易的に見積りを行う本手法が有効（図 1-2 で示したリスクマトリックスのように 5 段階に分割する方法は、実証段階にある技術に適用するのは難しい）
- 同じハザードに対する安全対策の中でも、特にリスク等級を上げる要因となっている要素に対する対策を重みづけできるという意味でも有効

上記を踏まえ、本調査で対象とする発電設備のリスク評価における、リスクパラメータとリスク等級の判定基準の案を表 1-3 および表 1-4 に示す。ここで、危害の程度については、人への危害、物への危害、環境への危害の 3 つに分けて定義を行うものとしている。

暴露頻度に関しても、危害の対象によって判断基準を設ける必要がある。例えば人の場合は、通常運用時に人が周囲にいるかどうかで判断する。物や環境の暴露頻度は、選定したサイトによって異なるため、サイトの周囲環境をもとに判断する。

また、事象の発生確率については、「機械設備のリスクアセスメントマニュアル 機械設備製造者用」（中央労働災害防止協会）にて示されている定義方法を採用した。ただ、現実的には故障の発生頻度を見積もることは難しい。そこで、技術の信頼性が低いほど事象の発生確率は高い、という考え方から、本調査で対象とする発電技術は、基本的に「新技術」（＝未実証技術のため信頼性がない）として、機器関連の事象の発生確率は O3 と記すことを推奨する。ただ、すでに実証されている他の技術が応用できる前提のものであれば、実証されている技術として O1 や O2 に変更される可能性がある。

表 1-3　リスクパラメータの定義

危害の程度	S1	人への危害：軽度の傷害（通常元に戻れる） 物への危害：自損、第三者の器物への修復可能な軽度な危害 環境への危害：修復可能な軽度の環境への危害
	S2	人への危害：重度の傷害（死を含め元に戻れない） 物への危害：第三者の器物への修復不可能な重度な危害 環境への危害：修復不可能な大規模な環境への危害
暴露頻度	F1	暴露頻度が比較的高い
	F2	暴露頻度が比較的低い
回避可能性	A1	いくつかの条件下で回避可能性あり
	A2	回避不可能
事象の発生確率	O1	安全分野で証明され、承認されている成熟した技術
	O2	過去 2 年間で技術的故障が発見されている ・ リスクに気付き、また作業場で 6 ヶ月以上の経験を持つ十分に訓練を受けた人による不適切な挙動（人に依存する場合） ・ 過去 10 年以上発生していない類似の事故（類似事故の有無から判断する場合）
	O3	定期的に見られる技術的な故障 ・ 作業場で 6 ヶ月以下の経験を持つ十分に訓練を受けていない人による不適切な挙動（人に依存する場合） ・ 過去 10 年間に工場で見られた類似の事故（類似事故の有無から判断する場合）

出所）中央労働災害防止協会[1-6]等より三菱総合研究所作成

表 1-4　リスク等級の判定法

危害の程度	暴露頻度	回避可能性	事象の発生確率		
			O1	O2	O3
S1 軽度	F1 稀	A1　可	1	1	2
		A2　不可	1	1	2
	F2 頻繁	A1　可	1	1	2
		A2　不可	1	1	2
S2 重度	F1 稀	A1　可	2	2	3
		A2　不可	2	3	4
	F2 頻繁	A1　可	3	4	5
		A2　不可	4	5	6

リスク等級
（数字が大きいほど優先度が高い）

出所）日本機械工業連合会ガイドライン[1-7]より三菱総合研究所作成

1.4.3　安全対策の立案

安全対策として､その安全対策がリスクのどの要素に寄与するかを把握しておくことは重要である。よって、前述のリスクグラフ法で用いられているリスクパラメータに対応させ、「ソース（発生源）を取り除く、危害を小さくする」「危険状態の発生頻度を下げる」「危険事象の発生確率を下げる」「危険事象の回避可能性を高める」という 4 つの観点から対策を立案した。

図 1-5 に、危害発生までのプロセスとリスクパラメータの関係を示すとともに、プロセスの中で 4 種の安全対策がどの位置にあたるかを示す。この手法を用いることで、対策の網羅性を高めると同時に、複数のハザードに対する安全対策となりうるものや、コスト等の理由により実現が難しい安全対策の代替対策を把握することが可能になると考えられる。

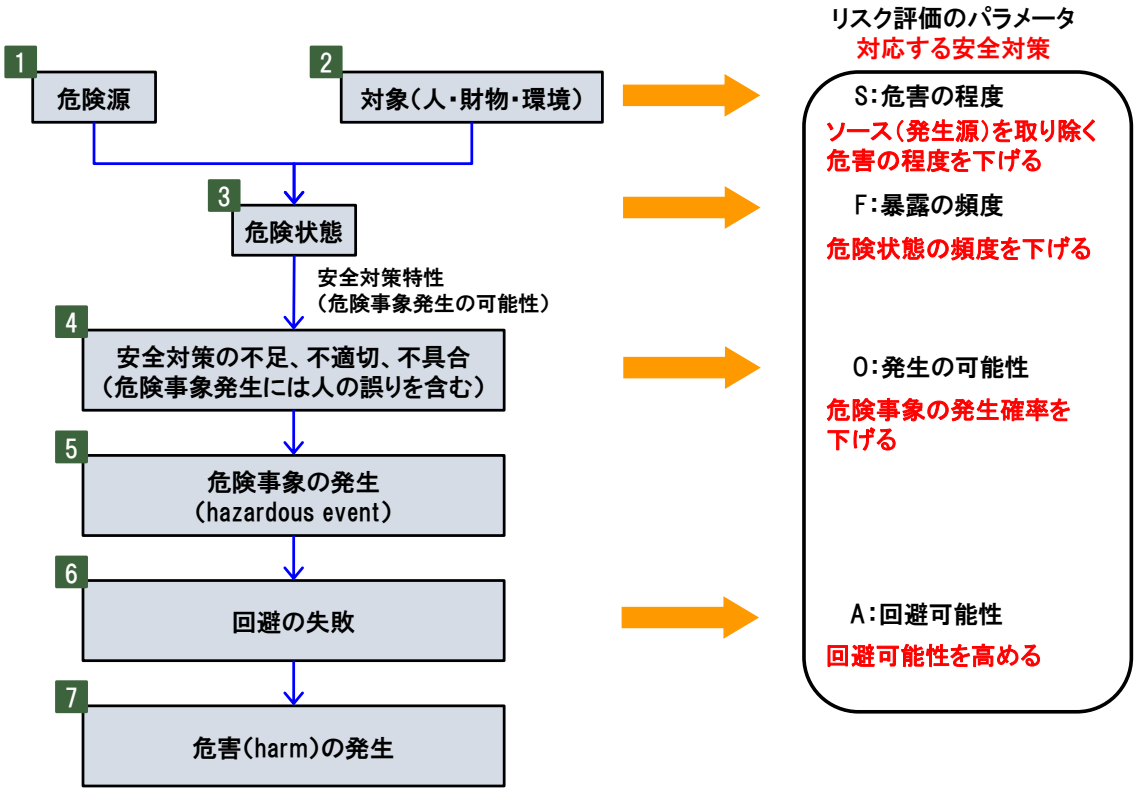


図 1-5　危害発生までのプロセスとリスクパラメータ及び安全対策の関係

2. 潮流発電・波力発電

2.1 国内外の技術開発および安全規制にかかる動向

本節では、潮流発電・および波力発電のリスクの識別・評価と安全対策の整理を行う際の基礎情報として、国内外における技術開発動向、および安全性に係る企画、安全規制の動向について整理した。

2.1.1 潮流発電・波力発電の技術開発・導入普及状況及び今後の見通し

(1) ポテンシャル

1) 世界のポテンシャル

潮流発電のポテンシャルを図る指標として、世界の潮位差分布を図 2-1 に示す。潮流発電は、沿岸部の海峡や水道等、潮流の大きくなる水域のポテンシャルが大きく、波力と比較すると地域性が強いため、適地が限定的となる。欧州においては、特に英国・スコットランド周辺海域にポテンシャルが集中しており、スコットランドには、欧州の潮力エネルギーの25%が賦存していると試算されている[1]。

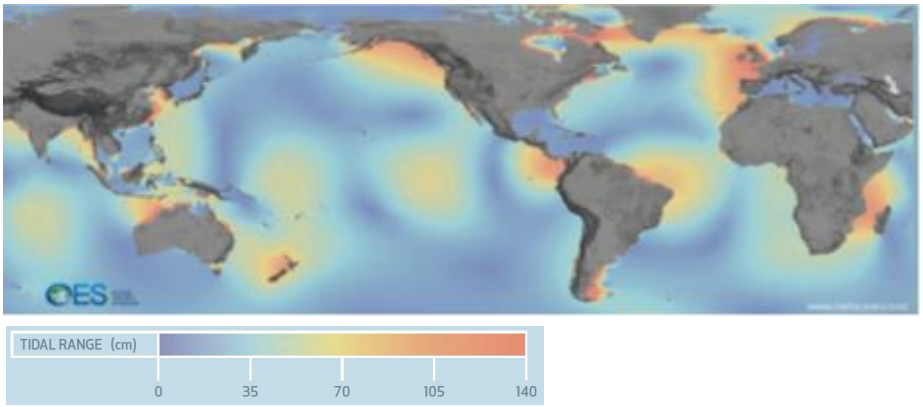


図 2-1 世界の潮位差分布[cm]

出所）“An International Vision for Ocean Energy”（IEA-OES 資料）[2-1]

世界の波力エネルギー密度の分布を図 2-2 に示す。欧州西海岸、北米西海岸、南米の南岸、南オーストラリアの海域等の波力エネルギー密度が大きく、偏西風の影響により、一般に大陸西海岸が大きく、東海岸は小さい傾向にある。日本はユーラシア大陸の東側に位置しており、海外諸国と比較すると波力エネルギー密度は小さい。

欧州は、世界的に最も波力エネルギーポテンシャルに恵まれた地域の一つであり、特に英国およびスコットランドは波力エネルギー密度が 20～70kW/m と大きく、欧州の波力エネルギーポテンシャルの約 10%がスコットランドに賦存している[2-2]。

[1] Marine Scotland ウェブページ（http://www.scotland.gov.uk/Topics/marine/marineenergy）

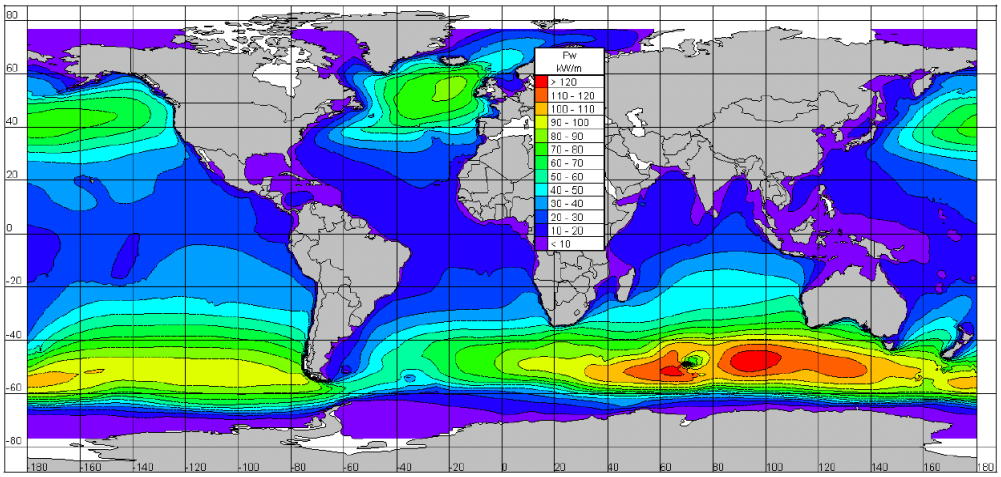
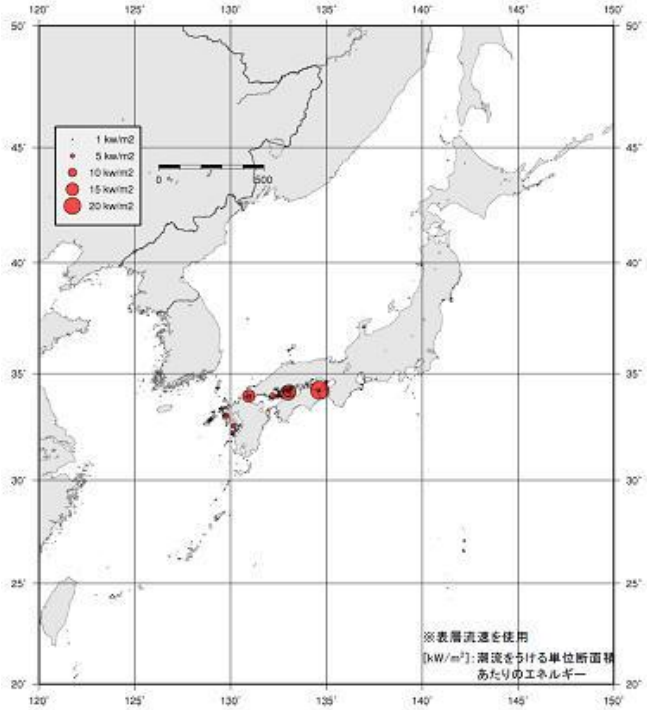


図 2-2　世界の波力エネルギー密度の分布（年平均、kW/m）

出所）“A GLOBAL WAVE ENERGY RESOURCE ASSESSMENT”（Andrew M. Cornett, 2008）[2-3]

2）日本のポテンシャル

日本の潮流エネルギー密度を図 2-3 に示す。平成 22 年度の NEDO による「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」では、日本における潮流エネルギーの賦存量は約 22GW、現実的な導入量は約 1.9GW、発電可能量は 6TWh（年間電力需要の約 0.7%）と試算されている。潮流が強い箇所のほとんどは、瀬戸内海と九州西岸に存在している。津軽海峡でも強い潮流が見られる。



注）海図に記載のある日本沿岸の海峡・瀬戸・水道等 281 地点のうち、流速表示のある 150 地点

図 2-3　日本の潮流エネルギー密度[kW/m2]（月齢周期平均）

出所）「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」（2011、NEDO）[2-4]

日本周辺海域の年平均波力エネルギー密度を図 2-4 に示す。同調査では、日本近海の波力エネルギー密度は、沿岸域においては 10kW/m 未満、沖合で約 20kW/m 程度と試算されている。また、波力エネルギーの賦存量（沖合 100km まで）は 195GW、現状技術を想定した場合の発電可能量は 19TWh（年間電力需要の約 2% ）と試算されている。

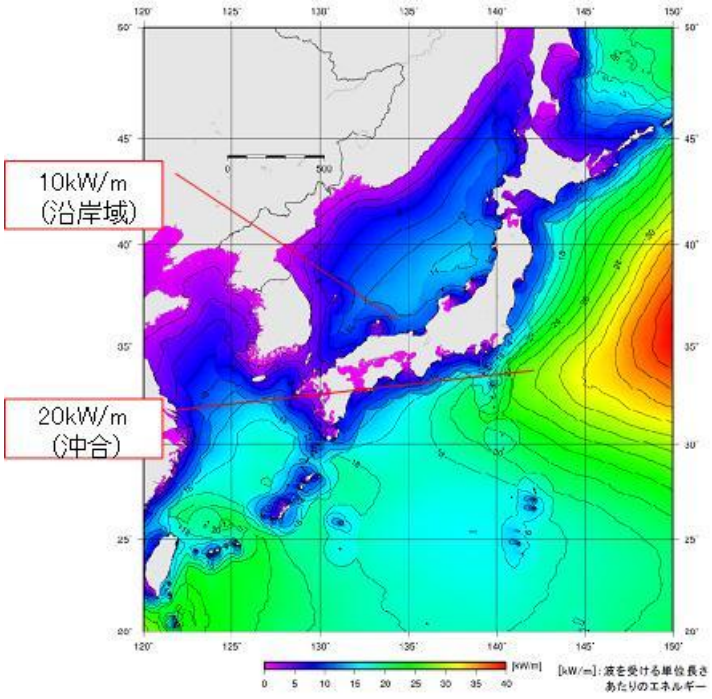


図 2-4　日本周辺海域の年平均波力エネルギー密度［kW/m］

出所）「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」（2011、NEDO）[2-4]

(2) 導入実績・導入見通し

潮流発電、波力発電ともに、現在実証試験の段階にあり、商用運転を開始しているプラントはない。2008 年にポルトガル沖において、総出力 2,250kW（750kW×3 基）の商用プラント（Agucadoura Wave Farm）が運転を開始したが、数週間で故障が発生し、その後再稼動は確認されていない。

しかしながら、潮流・波力発電両方の適地であるスコットランドを中心として、技術開発は着実に進められている。スコットランドでは、2020 年までに 1.6GW（潮流発電 1.0GW、波力発電 0.6GW）の高い導入目標が掲げられており、目標達成に向けて、海洋エネルギー発電設備専用の実証試験サイトである EMEC（European Marine Energy Centre）[2-5]が建設されている（詳細は後述）。また、世界初の海洋エネルギー発電事業の海域商用リースとなる ROUND1 プロジェクトを開始している。ROUND1 プロジェクトでは、スコットランド政府の指定海域において事業者が選定され、現在、幾つかの事業者（SSE、ScottishPower Renewables、E.On、ABB 等）が海面リース契約を結び、波力・潮流発電の商用プラント建設に向けて、EMEC において技術開発を進めている。

スコットランドに加えて、フランス、ポルトガル、デンマーク等においても、実用化に向けた技術開発が実施されている。

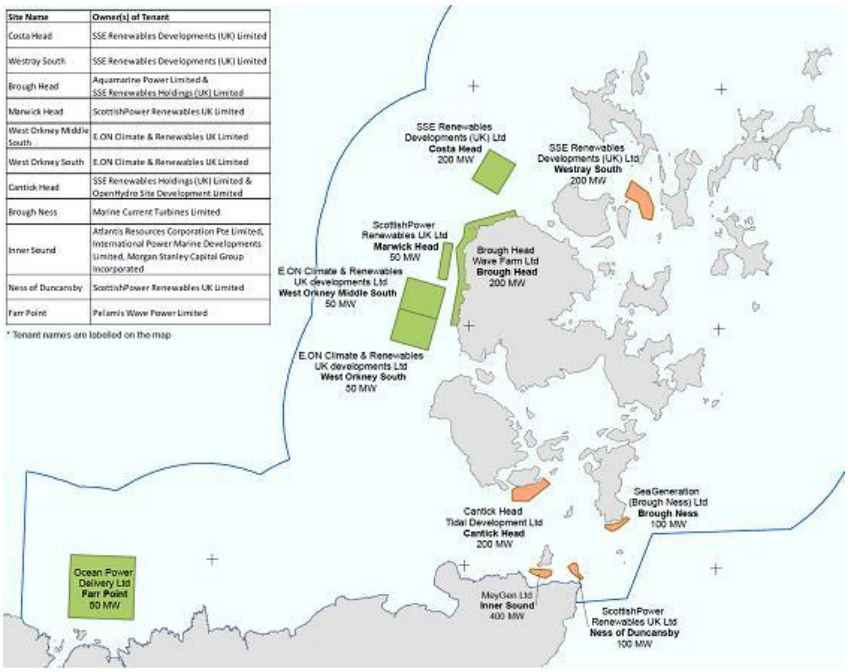
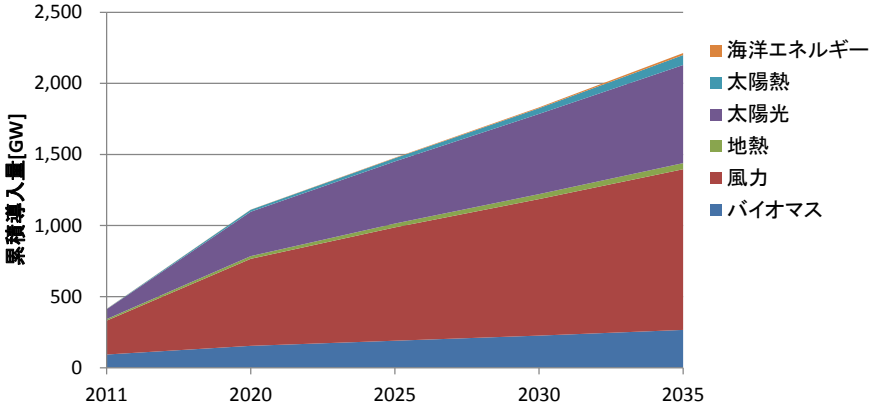

Site Name | Owner(s) of Tenant
Costa Head | SSE Renewables Developments (UK) Limited
Westray South | SSE Renewables Developments (UK) Limited
Brough Head | Aquamarine Power Limited & SSE Renewables Holdings (UK) Limited
Marwick Head | ScottishPower Renewables UK Limited
West Orkney Middle South | E.ON Climate & Renewables UK Limited
West Orkney South | E.ON Climate & Renewables UK Limited
Cantick Head | SSE Renewables Holdings (UK) Limited & OpenHydro Site Development Limited
Brough Ness | Marine Current Turbines Limited
Inner Sound | Atlantis Resources Corporation Pte Limited, International Power Marine Developments Limited, Morgan Stanley Capital Group Incorporated
Ness of Duncansby | ScottishPower Renewables UK Limited
Farr Point | Pelamis Wave Power Limited
* Tenant names are labelled on the map
SSE Renewables Developments (UK) Ltd Costa Head 200 MW
SSE Renewables Developments (UK) Ltd Westray South 200 MW
ScottishPower Renewables UK Ltd Marwick Head 50 MW
Brough Head Wave Farm Ltd Brough Head 200 MW
E.ON Climate & Renewables UK developments Ltd West Orkney Middle South 50 MW
E.ON Climate & Renewables UK developments Ltd West Orkney South 50 MW
SeaGeneration (Brough Ness) Ltd Brough Ness 100 MW
Cantick Head Tidal Development Ltd Cantick Head 200 MW
Ocean Power Delivery Ltd Farr Point 50 MW
MeyGen Ltd Inner Sound 400 MW
ScottishPower Renewables UK Ltd Ness of Duncansby 100 MW

図 2-5　Round 1 プロジェクト指定海域

※　緑：波力発電の指定海域　オレンジ：潮流発電の指定海域

出所）“Wave and Tidal Energy in the UK”　（2011, Renewable UK）[2-6]

IEA（International Energy Agency）の World Energy Outlook 2013 では、世界の海洋エネルギー発電（潮流発電、波力発電、海洋温度差発電等の合計）の導入量を図 2-6 のとおり試算している。導入コストが高いこと等から、他の再生可能エネルギーとの比較においては、必ずしも導入量は大きくないが、2020 年時点で 1GW（1MW 基 1,000 台分）、2030 年時点で 6GW（1MW 基 6,000 台分）と、一定量の導入が見込まれている。



単位[GW]

	2011	2020	2025	2030	2035
バイオマス	93	154	190	226	266
風力	238	612	797	960	1,130
地熱	11	19	27	35	43
太陽光	69	312	437	564	690
太陽熱	2	14	23	40	70
海洋エネルギー	1	1	3	6	14

図 2-6　再生可能エネルギーの導入見通し

出所）IEA“World Energy Outlook 2013”　[2-7]

(3) 技術開発動向

1）代表的な潮流発電装置

潮流発電システムにおけるエネルギー変換装置には一般的に水車が用いられ､海水の流れる運動エネルギーをタービンの回転を介して電気エネルギーに変換する｡タービンは風力発電と同様に、回転軸の方向によって「水平軸型」と「垂直軸型」に分けられる。現在は「水平軸型」を採用するシステムが主流となっている[2-8]。

① 水平軸型タービン：海水の流れに対して水平な回転軸に取り付けた２枚もしくは 3 枚の羽根（ブレード）により、潮流の運動エネルギーを回転運動に変え、発電機を回し発電する方式である。最も代表的な方式はプロペラ式であり、多くのプロジェクトで採用されている。

② 垂直軸型タービン：回転軸が海水の流れに対して垂直であるタービンで、ダリウス式やサボニウス式が代表的である。流れの方向に対する依存性が少なく、一般的にブレードの製造がプロペラ式に比べて容易である等の利点を有する。

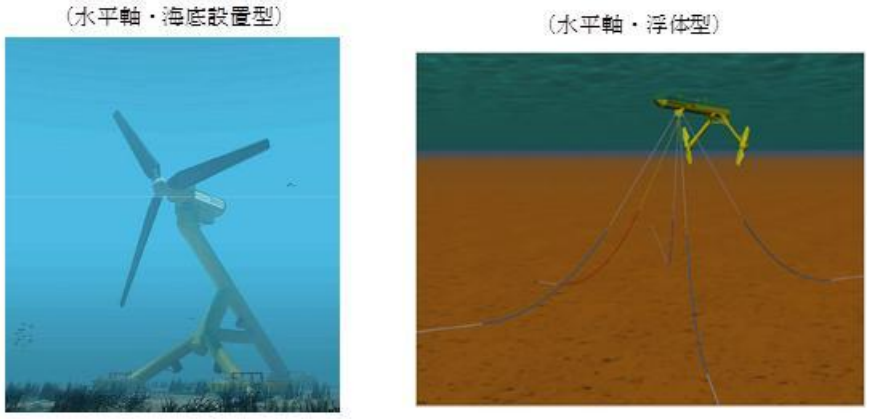


図 2-7　潮流発電システムの設置形式（左：固定式　右：浮体式）

出所）Hammerfest Strom 社ホームページ[2-9]、Scotrenewables Tidal Power 社ホームページ[2-10]

2）代表的な波力発電装置

現在、様々な形式の波力発電装置が開発されているが、技術的には以下の 3 種類に大別される[2-7]。世界で最も技術開発が進んでいるスコットランドでは、「可動物体型」の波力発電装置の開発が主流となっている。日本においては、振動水柱型の技術開発が主流であったが、現在 NEDO において実施されている海洋再生エネルギー実証研究では、可動物体型の装置の開発が進んでいる。

① 振動水柱型:装置内に空気室を設けて海面の上下動により生じる空気の振動流を用いて、空気タービンを回転させる方式。構造が簡素で、空気を介してエネルギー変換するため、台風等の異常波浪に対する構造物の対策が比較的取りやすく、より安全な形式とされている。
② 可動物体型 : 波力エネルギーを可動物体を介して油圧に変換した後、油圧モータ等を用いて発電するシステム。沖合に設置される波力発電装置の主流。
③ 越波型 : 波を貯水池等に越波させて貯留し、水面と海面との落差を利用して海に排水する際に、導水溝に設置した水車を回し発電する方式。

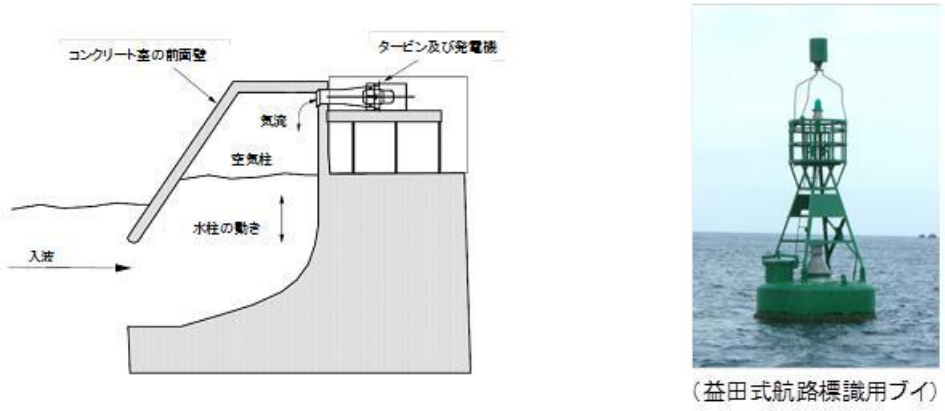


図 2-8　振動水柱型波力発電システム（左：固定式　右：浮体式）

出所）（左図）“Ocean Energy: Global Technology Development Status”（2009、 IEA-OES）[2-11]、（右図）緑星社ホームページ[2-12]

図 2-9　可動物体型波力発電システムの例

出所）三井造船技法 No.210（2013-11）[2-13]、EMEC ウェブページ[2-5]、NEDO 海外レポート No.1044[2-14]

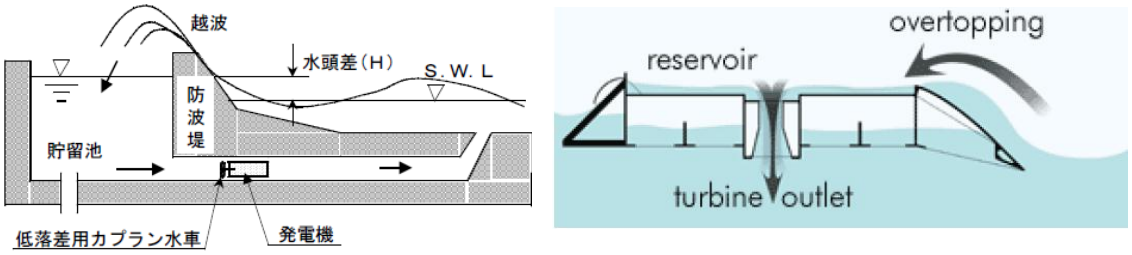


図 2-10　越波型波力発電システム例（上：固定式　下：浮体式）

出所）「海洋資源利用に関する調査」（2006、（独）海上技術安全研究所）[2-15]、Wave Dragon ApS 社ホームページ[2-16]

3）潮流発電・波力発電の技術開発ステージ

潮流発電および波力発電は、現在実用化に向けた技術開発途上にある。海洋エネルギー発電の技術開発は、大きく陸上試験と実海域試験に分けられ、欧州では、図 2-11 に示す技術開発ステージを進むのがモデルケースとなっている。現在、欧米の先進企業は Stage4-5 の段階にあり、スコットランドの EMEC に代表される実海域試験サイトにおいて、小規模～大規模プロトタイプ機の技術開発が進められている。日本企業は現在 stage2-3 の段階にあり、遅れを取る状況にある。

潮流発電は、現在複数のタイプの装置が提案されているが、風力発電等の既存技術の応用が可能であることから、構造体部分（構造・原動機、動力取出装置等）の基礎的な技術は確立しつつあり、波力発電より早期に実用化し、市場が拡大することが見込まれている[2-16]。

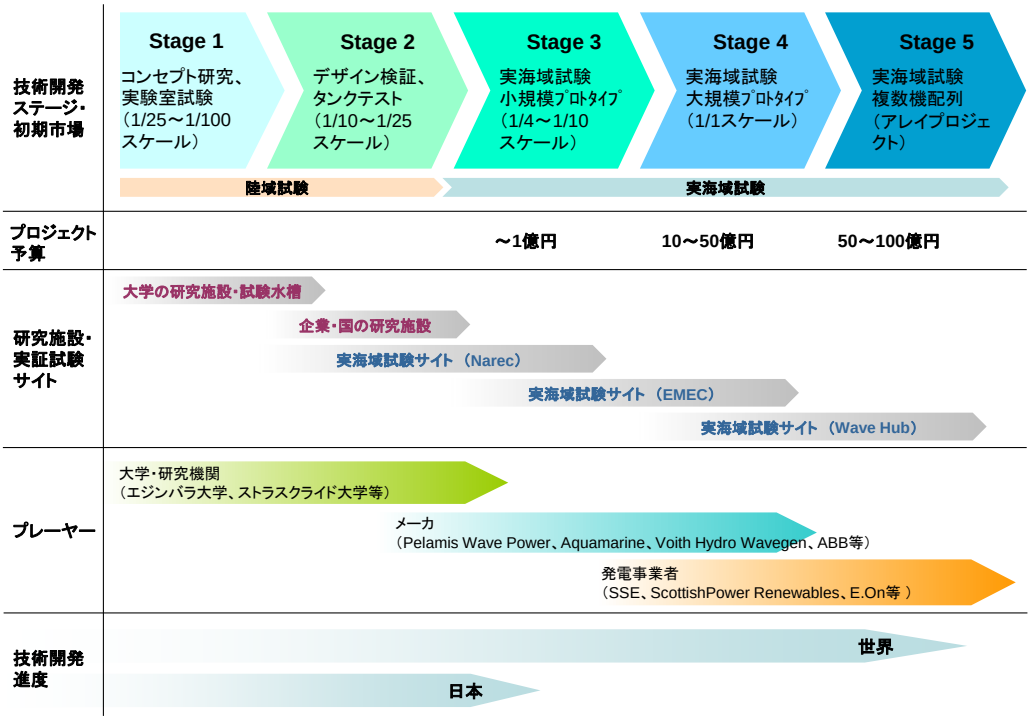


図 2-11　海洋エネルギーの技術開発ステージと技術開発進度

出所）「海洋エネルギー発電技術に関する情報収集・分析」（2012, NEDO）[2-17]

4）海外における技術開発状況

海外においては、スコットランドが潮流発電・波力発電の技術開発において世界を先導しており、実海域における海洋エネルギー発電専用の実証試験サイトである EMEC（European Marine Energy Center）を 2003 年に建設した。EMEC は、スコットランドのオークニー諸島に位置し、波力発電および潮流発電のフルスケール実証機の実海域試験を行うことができる。波力発電のテストサイトは 5 つ、潮流発電のテストサイトは 8 つ用意されている（図 2-12）。両サイトにおいて、陸上までの海底ケーブル、変電所、風速・波高等の計測所、オフィス・データ解析施設等を備えている（表 2-1）。

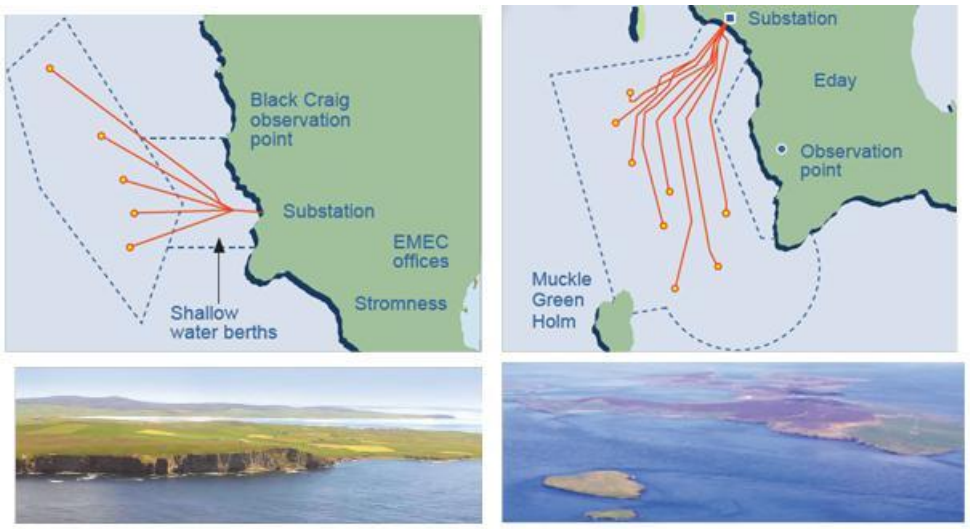


図 2-12　EMEC 実証試験サイト（左：波力発電、右：潮流発電）

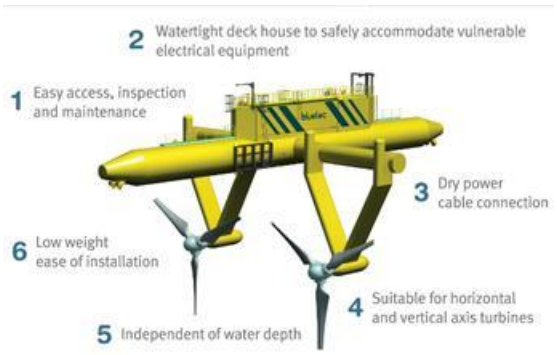
出所）EMEC ホームページ [2-5]

表 2-1　EMEC 実証試験サイトの概要

	波力テストサイト	潮流テストサイト
離岸距離等	約 1～2km	約 2～4km　（ケーブル長さ）
水深	約 50m	約 12～50m
海象条件	波高　～15m	潮流速　大潮：3.5m/s　小潮：1.5m/s
海底送電ケーブル	AC、当初は 11kV→現在は 3.3kV と 6.6kV、陸上変電所で 11kV に昇圧して系統連系	左記と同様
主要な陸上施設	・　海況データ測定設備（波高・波長・海流速度・方向等） ・　変電所（系統連系のための開閉装置、補助変圧器、バックアップ用発電機、力率改善回路装置、受送電メーター、通信機器等） ・　データセンター（実験サイト・各計測機器からのデータを光ファイバで受信） ・　気象観測ステーション	

EMEC では現在、潮流発電については 8 社、波力発電については 5 社が実証試験を実施しており、日本からは川崎重工業が潮流発電装置の実証試験を実施予定である。各社の発電装置を見ると、潮流発電については、水平軸型タービンを採用している事業者が多い。一方

波力発電については、形状、発電方式ともに多種多様であり、様々な技術が試行されている状況にある。



（潮流発電）

（波力発電）

図 2-13　EMEC で実証試験を実施している発電装置例

出所）EMEC ホームページ[2-5]

5）日本における技術開発状況

日本では、NEDO の海洋エネルギー発電システム実証研究、次世代海洋エネルギー技術研究開発において、表 2-2 に示す技術開発が進められている。現在、有識者委員会により、技術審査（ステージゲート）が実施されている。

表 2-2　NEDO 海洋エネルギー技術研究開発　実施体制

研究開発項目	研究テーマ	実施事業者	事業期間
海洋エネルギー発電システム実証研究（実証研究）	ジャイロ式波力発電	（株）ジャイロダイナミクス、日立造船（株）	H23～H27 年度
	機械式波力発電	三井造船（株）	H23～H27 年度
	空気タービン式波力発電	三菱重工鉄構エンジニアリング（株）、東亜建設工業（株）	H23～H27 年度
	着定式潮流発電	川崎重工（株）	H23～H27 年度
	浮体式潮流発電	三井海洋開発（株）	H24～H27 年度
	越波式波力発電	市川土木（株）、協立電機（株）、いであ（株）	H24～H27 年度
次世代海洋エネルギー技術研究開発	海洋温度差発電	（株）神戸製鋼所、佐賀大学	H23～H27 年度
	水中浮遊式海流発電	（株）IHI、（株）東芝、東京大学、（株）三井物産戦略研究所	H23～H27 年度
	油圧式潮流発電	佐世保重工業（株）、東京大学、九州大学	H24～H27 年度
	橋脚利用式潮流発電	五洋建設（株）、広島工業大学、ナカシマプロペラ（株）	H24～H27 年度

出所）NEDO 資料 [2-18]

各採択案件の概要を図 2-14、

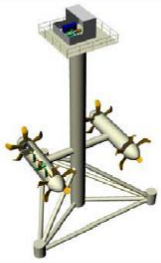
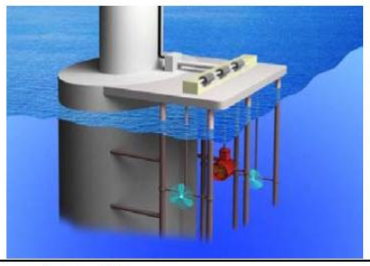
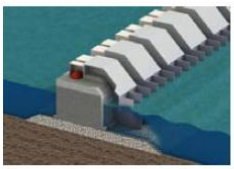
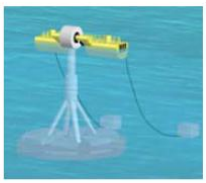
	油圧式潮流発電	橋脚利用式潮流発電
イメージ		
体制	・佐世保重工業(株) ・東京大学 ・九州大学	・ナカシマプロペラ(株) ・五洋建設(株) ・広島工業大学
原理	・上げ潮、下げ潮にそれぞれ対応したツインローターにより、潮流の流体エネルギーを回転運動で油圧に変換し、油圧式の同期発電機で発電。	・上げ潮、下げ潮に一枚翼で対応する対称翼により、潮流の流体エネルギーを回転運動に変換し、同期式発電機で発電。
開発項目	要素技術開発 ・ツインブレードの開発 ・高効率油圧制御システムの開発	要素技術開発 ・対称ブレードの開発 ・橋脚設置用の基礎開発
設備容量 (検討中)	・250kW級	・100kW級
寸法等 (検討中)	・浮遊設置:水深15～50m ・ブレード直径:3.0m ・油量:200リットル	・基礎構造:幅9m×長さ20m (橋脚構造:幅25m×長さ25m) ・ブレード直径:3.2m

図 2-15 に示す。潮流発電については、川崎重工業にて水平軸型タービンの技術開発が行われており、先述のとおり、スコットランドの EMEC において実証試験を実施する予定である。波力発電については、EMEC と同様に様々な装置が開発されている。

	波力発電			潮流発電
	機械式	空気タービン式	ジャイロ式	着定式
イメージ				
体制	・三井造船(株)	・三菱重工鉄構エンジニアリング(株) ・東亜建設工業(株)	・日立造船(株) ・(株)ジャイロダイナミクス	・川崎重工業(株)
原理	・波の上下運動をラック&ピニオンで回転運動に変換し、発電機で発電。	・波で生じる空気室の動揺を空気タービンの回転運動に変換し発電機で発電。	・波による上下運動をフライホイールの回転運動に変換し発電機で発電。	・海底にブレードや発電機等からなるナセルを設置し、潮流の流体エネルギーを回転運動に変換し発電機で発電。
開発項目	・同調制御を利用した、緊張係留によるパワーブイの開発。	・空気室とウォールによる共振現象を利用した、高効率な防波堤設置式の波力発電の開発。	・密室構造で発電機が外気、海水に接しないジャイロ式の波力発電の開発。	・設置やメンテナンスの際に、潜水士を不要とする海底設置式の潮流発電の開発。
設備容量 (検討中)	定格80kW級	定格100kW級	定格100kW級	定格1000kW級
寸法等 (検討中)	・フロート直径:8.5m ・全高53m(海面上:10m)	・ウォール幅:20m ・ウォール奥行:10m	係留装置:26m×26m×29.4m (基礎含む)<P> 浮体:4.2m×3.4m×14.8m<P>	・海底設置:水深30～50m ・水中翼直径:18m ・ナセル長:17m

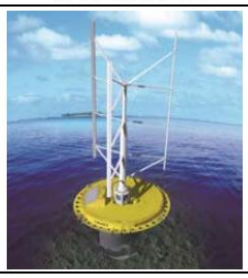
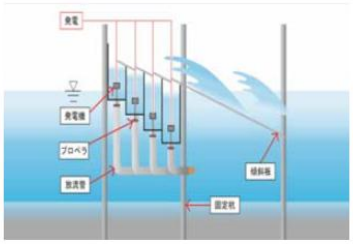
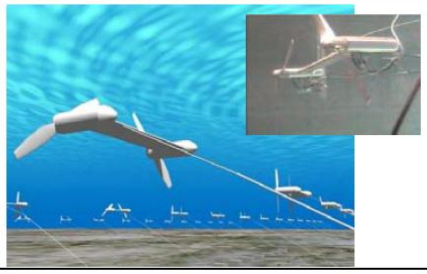
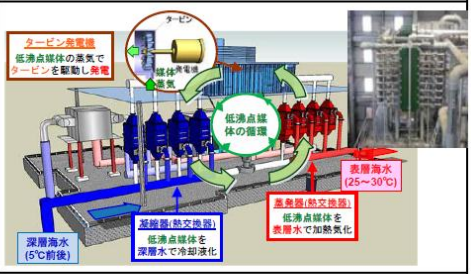
	浮体式潮流発電	越波式波力発電
イメージ		
体制	・三井海洋開発(株)	・市川土木(株) ・協立電機(株) ・いであ(株)
原理	・浮体構造物に垂直タービンを適用し、潮流の流体エネルギーを回転運動に変換し、発電機で発電	・越波による位置エネルギーをタービンの回転運動に変換し、発電機で発電
開発項目	・荒天時に耐えうる浮体構造・係留方法の確立と共に、高効率垂直式の潮流タービンを開発する。	・傾斜角度と水槽容量の最適化及び放流管等への生物付着対策による高効率越波式の波力発電の開発。
設備容量 (検討中)	・500kW級(風車)＋50kW級(水車)	・25kW級
寸法等 (検討中)	・垂直軸ローター:直径15m×長さ20m ・浮体:直径29m×高さ7m ・水深対応:18m以上	・デバイス幅:20m ・奥行:5m ・高さ:5m

図 2-14　NEDO 海洋エネルギー発電システム実証研究採択案件

出所）NEDO 資料 [2-18]

	水中浮遊式海流発電	海洋温度差発電
イメージ		
体制	・(株)IHI ・(株)東芝 ・(株)三井物産戦略研究所 ・東京大学	・(株)神戸製鋼所 ・佐賀大学
原理	・海中に浮遊式のブレードや発電機等からなる装置を設置し、海流の流体エネルギーを回転運動に変換し発電機で発電。	・海表面と深層の温度差を利用して作動流体を循環させ、タービンの回転運動に変換し発電機で発電。
開発項目	要素技術開発 ・浮体・係留システムの安定性やメンテナンス性の高度化 ・タービン発電機の高効率化	要素技術開発 ・熱交換器の熱交換効率向上 ・熱サイクル効率向上
設備容量 (検討中)	・2000kW級	・1000kW級
寸法等 (検討中)	・タービン直径:40m ・幅:100m(ブレード含め) ・奥行き:10m	・深層取水管径:1.6m ・深層取水管長:4,700m ・発電設備:25m×25m

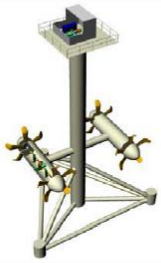
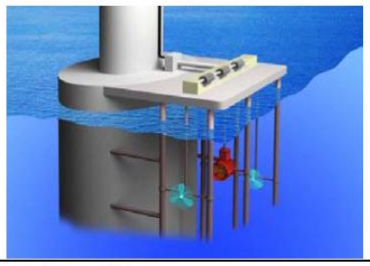
	油圧式潮流発電	橋脚利用式潮流発電
イメージ		
体制	・佐世保重工業(株) ・東京大学 ・九州大学	・ナカシマプロペラ(株) ・五洋建設(株) ・広島工業大学
原理	・上げ潮、下げ潮にそれぞれ対応したツインローターにより、潮流の流体エネルギーを回転運動で油圧に変換し、油圧式の同期発電機で発電。	・上げ潮、下げ潮に一枚翼で対応する対称翼により、潮流の流体エネルギーを回転運動に変換し、同期式発電機で発電。
開発項目	要素技術開発 ・ツインブレードの開発 ・高効率油圧制御システムの開発	要素技術開発 ・対称ブレードの開発 ・橋脚設置用の基礎開発
設備容量 (検討中)	・250kW級	・100kW級
寸法等 (検討中)	・浮遊設置:水深15～50m ・ブレード直径:3.0m ・油量:200リットル	・基礎構造:幅9m×長さ20m (橋脚構造:幅25m×長さ25m) ・ブレード直径:3.2m

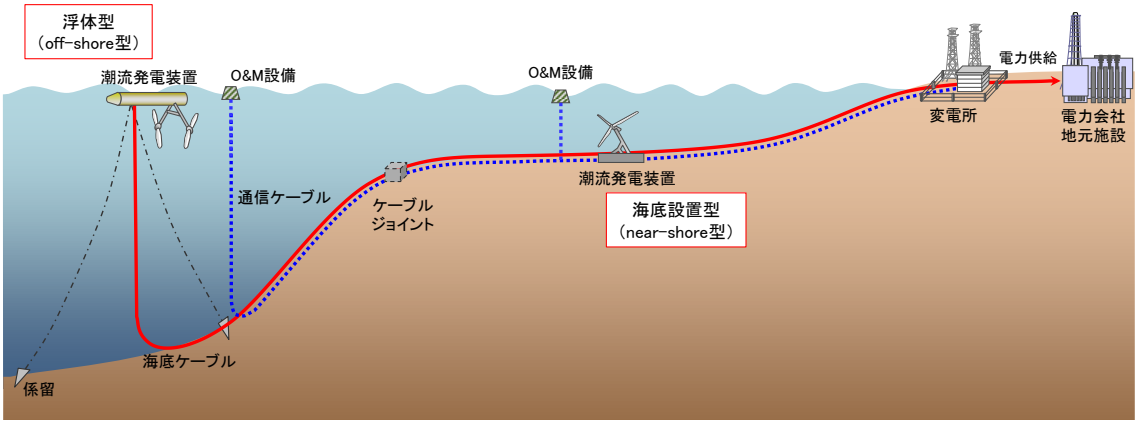
図 2-15　NEDO 次世代海洋エネルギー技術研究開発採択案件

出所） NEDO 資料 [2-18]

6）技術開発課題

a.　潮流発電の技術開発課題

潮流発電は、現在複数のタイプの装置が提案されているが、風力発電等の既存技術の応用が可能であることから、構造体部分（構造・原動機、動力取出装置等）の基礎的な技術は確立しつつあり、機器のタイプは水平軸型の 3 枚翼タイプが採用される傾向が見られる。実用化に向けては、基礎や設置、運転・保守に係る技術開発課題を解決することが求められている。また、設置方法によりおおまかな分類が可能であり、「海底設置型（着底型）」、「浮体型」の 2 種類に分類される[2-17]。



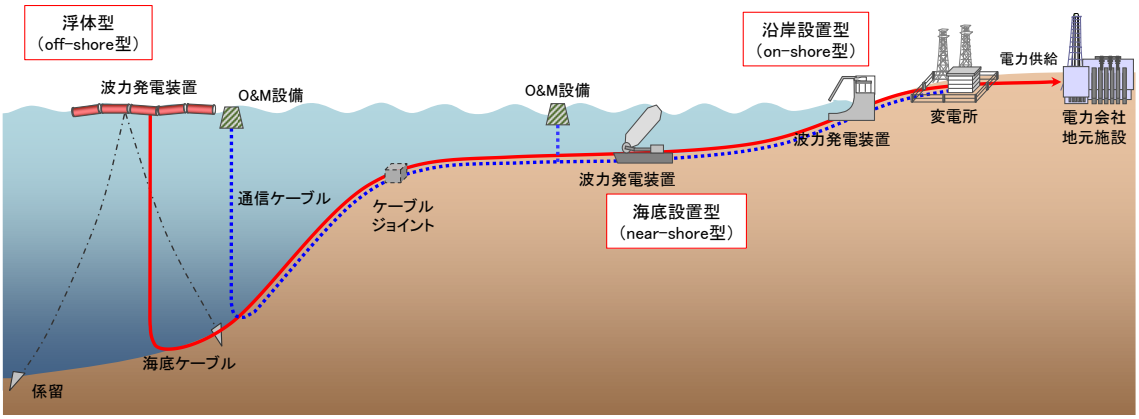
構成要素	浮体型（off-shore 型）	海底設置型（near-shore 型）
①構造・原動機	・実海域での性能解析による設計の改良、最適化 ・最適な安全率の設定	
②動力取出装置	・実海域での性能解析による設計の改良、最適化 ・発電効率の向上、発電量の増大（ダイレクトドライブや永久磁石発電機等の採用） ・潮流に対してタービンの向きを調節する最適ヨー制御システムの開発	
③係留/基礎	・係留コストの削減	・基礎に係るコストの削減 ・複雑な海底地形にも設置可能な基礎の設計・開発
④設置	・設置が容易な機器の設計 ・設置工程の最適化、工事日数の削減	
⑤グリッド接続	・海底ケーブルコストの削減 ・ケーブル敷設の効率改善、低コスト敷設技術の確立	
⑥運転・保守	・耐久性の向上 ・遠隔操作システム、機器の定常モニタリングによる故障の有無、前兆の把握 ・発電部分の陸域への輸送等メンテナンス戦略の策定 ・発電部分の基礎・グリッドからの着脱技術の開発 ・耐腐食、耐付着生物材料の開発	

図 2-16　潮流発電技術の技術分類と実用化に向けた技術開発課題

出所）「海洋エネルギー発電技術に関する情報収集・分析」（2012, NEDO）[2-17]

b.　波力発電の技術開発課題

波力発電は、多様な種類の装置が開発・提案されている状況にあり、基礎・原動機、動力取出装置に係る基礎的な技術の確立と、コスト削減に向けた技術開発が必要である。また、設置方法によりおおまかな分類が可能であり、「沿岸設置型」、「海底設置型（着底型）」、「浮体型」の 3 種類に分類される。沖合の方が、波エネルギー密度が高く大きい発電量が見込めるが、係留や接続、運転・保守において課題が多いことから、陸に近い技術から導入が進んでいくと考えられる。



	浮体型 (off-shore 型)	海底設置型 (near-shore 型)	沿岸設置型 (on-shore 型)
①構造・原動機	・実海域での性能解析による設計の改良、最適化 ・最適な安全率の設定		
②動力取出装置	・基礎技術の確立、実海域での性能解析による設計の改良、最適化 ・発電効率の向上、発電量の増大 ・気象条件等に合わせた最適運転制御システム、海象予測システムの開発 ・単機容量の拡大 ・出力の平滑化、エネルギー貯蔵技術の開発		
③係留/基礎	・係留コストの削減	・基礎に係るコストの削減 ・複雑な海底地形にも設置可能な基礎の設計・開発	
④設置	・設置が容易な機器の設計 ・設置工程の最適化、工事日数の削減		陸域のため設置が容易
⑤グリッド接続	・海底ケーブルコストの削減 ・ケーブル敷設の効率改善、低コスト敷設技術の確立		陸域のためグリッド接続が容易
⑥運転・保守	・耐久性の向上 ・遠隔操作システム、機器の定常モニタリングによる故障の有無、前兆の把握 ・発電機部分の陸域への輸送等メンテナンス戦略の策定 ・耐腐食、耐付着生物材料の開発		・耐久性の向上（陸域のためメンテナンスが容易）

図 2-17　波力発電の技術分類と実用化に向けた技術開発課題

出所）「海洋エネルギー発電技術に関する情報収集・分析」（2012, NEDO）[2-17]

2.1.2　潮流発電・波力発電に係る規格、安全規制を中心とした動向調査

(1) 海外

1) IEC

海洋エネルギーの国際標準は、2007 年に IEC の中に設置された TC114（Marine Energy – Wave, tidal and other water current coverters）にて検討が進められている。これまで 2011 年 12 月に IEC/TS 62600-1（用語集）が、2012 年 9 月に IEC/TS 62600-100（波力発電設備の発電性能評価）が発行されている。我が国においては、（社）電気学会　電気規格調査会（原動機部会）の中に国内委員会が設立されている。

TC114 内のワークプログラムの構造を図 2-18 に、TC114 で動いているワークプログラムを表 2-3 に示す。

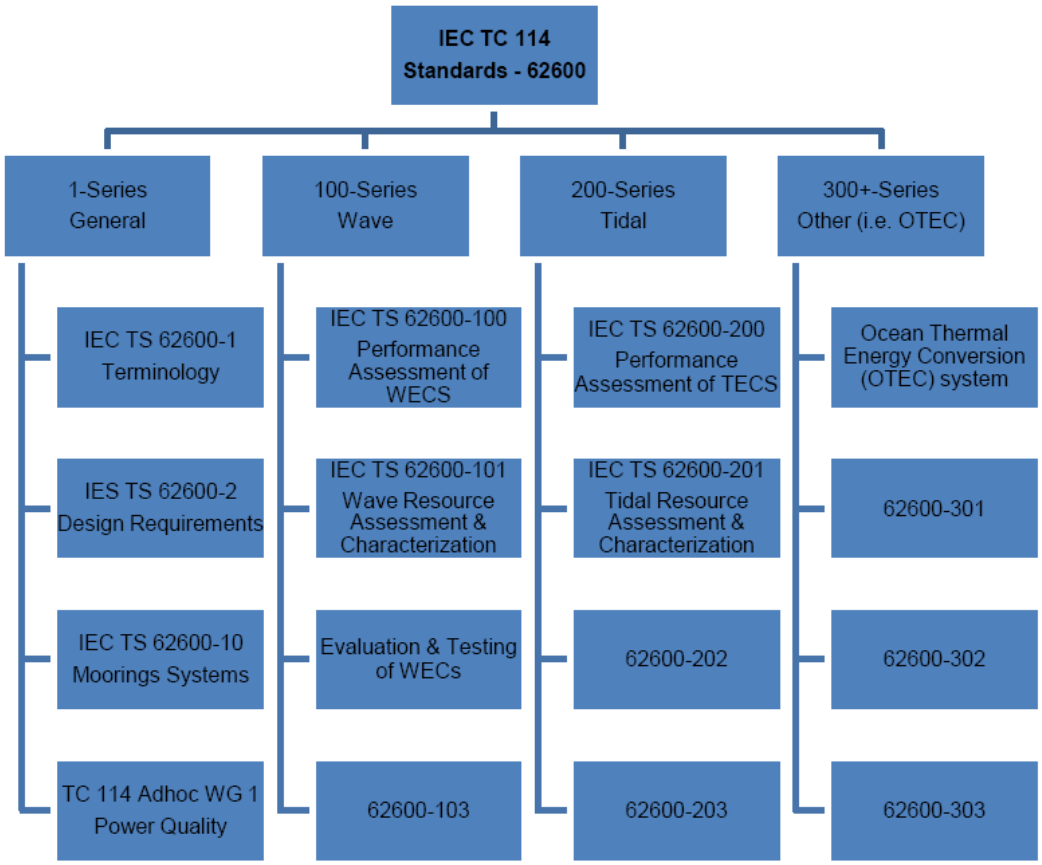


図 2-18　TC114 内のワークプログラムの構造

出所）「平成 23 年度 海洋発電システムの標準化に関する調査研究 報告書」一般財団法人エンジニアリング協会 [2-18]

表 2-3　IEC TC114 のワークプログラム

プログラム番号	規格名称
IEC/TS 62600-1 Ed. 1.0	Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 1: Terminology（用語の定義）
IEC/TS 62600-10 Ed. 1.0	Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 10: The assessment of mooring system for marine energy converters（海洋エネルギー発電装置の係留システムの性能評価法）
IEC/TS 62600-100 Ed. 1.0	Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 100: Electricity producing wave energy converters - Power performance assessment（発電性能評価方法）
IEC/TS 62600-101 Ed. 1.0	Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 101: Wave energy resource assessment and characterization（波浪エネルギーの算定方法）
IEC/TS 62600-102 Ed. 1.0	Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 102: Wave energy converter power performance assessment at a second location using measured assessment data（測定評価データを用いた波力発電装置の性能評価方法）
IEC/TS 62600-103 Ed. 1.0	Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 103: Guidelines for the early stage development of wave energy converters: Best practices & recommended procedures for the testing of pre-prototype scale devices（波力発電装置の開発初期段階のためのガイドライン）
IEC/TS 62600-2 Ed. 1.0	Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 2: Design requirements for marine energy systems（海洋エネルギーシステムの設計要件）
IEC/TS 62600-20 Ed. 1.0	Marine energy - Wave, tidal, and other water current converters - Part 20: Guideline for design assessment of Ocean Thermal Energy Conversion （OTEC）system（海洋温度差発電の設計評価ガイドライン）
IEC/TS 62600-200 Ed. 1.0	Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 200: Power performance assessment of electricity producing tidal energy converters（潮流発電装置の発電性能評価方法）
IEC/TS 62600-201 Ed. 1.0	Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 201: Tidal energy resource assessment and characterization（潮流エネルギーの算定方法）
IEC/TS 62600-30 Ed. 1.0	Marine Energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 30: Electrical power quality requirements for wave, tidal and other water current energy converters（波力、潮流、その他水流エネルギー発電の電力品質要領）

出所）IEC TC114 ウェブサイト [2-19]

a.　参加国

TC114 には、現在以下の 14 ヶ国のメンバーと 8 ヶ国のオブザーバーが参加している。議長国は米国、幹事国は英国である[2-20]。

≪TC114 の構成メンバー≫

- メンバー：米国（議長国）、英国（幹事国）、デンマーク、フランス、ドイツ、アイルランド、スペイン、日本、韓国、オランダ、ノルウェー、スウェーデン、中国、カナダ
- オブザーバー：ブラジル、ポーランド、ポルトガル、ウクライナ、イタリア、ロシア、チェコ、ルーマニア、サウジアラビア

2）欧州

欧州においては、英国・スコットランド、フランス、ポルトガル、デンマーク等において、海洋エネルギー発電設備の実海域における実証試験が実施されている。

なかでも、海洋再生可能エネルギーの技術開発を推進しているスコットランドでは、海洋再生可能エネルギー発電装置の専用の実証試験サイトである EMEC [2-5] [2]が建設されており、実海域における海洋エネルギーの設置・運用・撤去にかかる経験が最も豊富である。

スコットランドでは、EMEC の実証試験サイトに機器を設置する際の許認可要件を整えており、海洋再生可能エネルギーの規制体系整備で世界を先導している。したがって本節では、スコットランドにおける動向を中心に調査を実施した。

a. スコットランドにおける許認可手続き

スコットランドでは、Marine Scotland が海洋エネルギー発電設備の実海域への設置・運用に係る許認可手続きを所管しており、EMEC において海洋再生可能エネルギー発電設備を設置する際には、Marine Scotland による Marine Licence の発行が必要となる。

Marine Licence 発行のための要求文書としては、以下の 5 つが挙げられる[2-5][2-21]。

- Environmental Report（ER）
- Environmental Monitoring and Mitigation Plan（EMMP）
- Navigational Risk Assessment（NRA）
- Third-party Verification Certificate（TPV）
- Decommissioning Programme

これらの中で、発電装置の安全性の評価については、認証機関による Third Party Verification（第三者の検証）を受け、認証されたレポートの提出が必要となる。認証は信頼のおける民間企業、および独立機関の専門家によって行われるもので、その中でも DNV が認証機関の例として挙げられている [2-22]。

認証を受ける段階としては、大きく以下に示す 4 つに分けることができる。EMEC で実証試験をする際には、“Statement of Feasibility”および“Prototype Certification”の一部まで取得することが求められている[3]。

- Statement of Feasibility
- Prototype Certification
- Type Certificate
- Project Certificate

スコットランドにおいては、DNV や GL が認証機関として複数の実績を持つことから、今回の調査では主に DNV と GL のガイドラインを対象に、安全にかかる認証の枠組み、認証基準について調査を行った。

---

[2] 2.1.1(3) 4）を参照のこと。

[3] 事業者へのヒアリング調査より。

b. DNV・GL による認証の仕組み

ア） 概論

DNV および GL は、2013 年に統合され DNV・GL グループとなったものの、それまではお互い権威ある別々の認証機関として機能していた。EMEC においても認証を担う中心的な第三者機関であることは前述のとおりである。

DNV および GL の認証の考え方は ISO17000 の適合性評価の考え方に準拠しており、構造物・生産物・サービスが、定められた要求を満たしていることを確認するものであり、「人命」・「構造物」・「環境」を守るという大目的がある。

特に海洋発電（波力・洋上風力）分野の認証においては、人が立ち入らない構造物であることを踏まえた考え方をするとされており[2-23]、人が立ち入らない Oil & Gas 産業に似た安全要求レベルとなることが示唆されている。

また、設備の安全性は設置場所に依存するものでもあり、同時に設備そのものは製造物でもあるため、実証のためにはプロジェクト認証と型式認証の両方が必要となる。指示構造物や係留に関してはサイトに特化したプロジェクト認証、機器に関しては型式認証が重要視される。

EMEC でのプロトタイプ試験時、他の海域での実験時等、段階によって必要となる認証は異なる。ただ、認証において必要な基本的構成要素は共通しており、以下の 3 つに集約される。

① デザイン評価　　：設計の妥当性／性能の見積もり　等
② 実証試験　　：機器の試験／見積もりとの比較　等
③ 点検・品質管理　　：施工の確認／耐用年数の確認　等

図 2-19 に、DNV および GL の認証のプロセスを示す。それぞれの認証段階において、基本的には上記の 3 つの要素を中心とした要求事項が定められる。

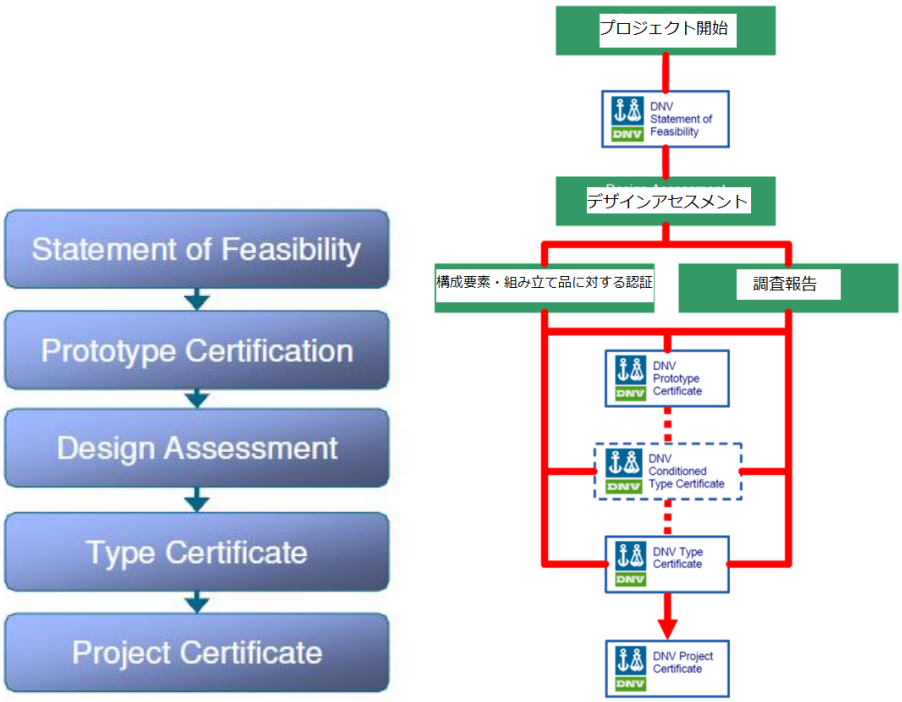


図 2-19　認証プロセスの流れ（左）：GL、　（右）：DNV

出所）Certification and Standards for Wind Turbines（GL WindEnergie, 2013）[2-23] および Technology Qualification（DNV, 2013）[2-24] をもとに三菱総合研究所作成

表 2-4　各種認証機関の陸上・洋上風力発電設備の認証に関する文書

Document						
Item	GL	DNV	IEC	ABS	BV	LR
Type Certification onshore	IV-1	DSS-904	IEC 61400-22			
Type Certification offshore	IV-2					
Project Certification onshore	IV-1		IEC 61400-22			
Project certification offshore	IV-2	OSS-901	IEC 61400-22	195/196	WFPC 100	Guidance

出所）Certification and Standards for Wind Turbines（GL, 2013）[2-25]

表 2-4 に、DNV および GL を含む各種認証機関の陸上・洋上風力発電設備の認証に関する文書の一部を示す。存在する文書を見ても分かるように、両社の認証スキームには若干の違いが残存する。今後 DNV と GL それぞれの持つ審査体系がどのように扱われるかは現在議論中である[4]。

本節では、前述の 4 つの認証段階での項目、着眼点の整理を行った。それぞれの認証における要求項目について、下表にまとめた。

[4] 日本海事協会へのヒアリング調査より。

表 2-5　DNV/GL の各認証フェーズにおける要求事項

Scope	要求項目
Statement of Feasibility **フィージビリティ・ステートメント（現状の技術で現実的に開発できるか判断）**	• 技術認証（DNV 推奨基準RP-A203） 1. 技術認証総合計画の策定 2. 認証基準の策定 3. 技術評価、故障モードおよびリスクの特定、技術の分類 4. 保守、状態監視、概念改良の可能性の評価 5. 信頼性評価のためのデータの収集および解析 6. 新技術の信頼性解析、機能要件に関する故障モードのリスク解析
Prototype certification **プロトタイプ認証**（EMECの場合はC-Design Assessmentのみで可） （有効期間：3年）	• プロトタイプデザイン評価(C-Design Assessment) • 基本的な安全性の妥当性の調査 • プロトタイプ製造の監視 • 設置調査 • 最終製品検査、試運転前検査 • 定期検査
Type Certification **型式認証** （有効期間：5年）	• デザイン評価（A- and B- Design Assessment） • 品質管理システム • 製造・建設時の要求事項の実施（IPE） • プロトタイプ試験
Project Certification **プロジェクト認証**	• サイト評価 • サイトに特化したデザイン評価（型認証された部分の改善） • 製造工程の検証 • 輸送、建設マニュアル • 試運転の調査 • 定期的なモニタリング

イ）　フィージビリティ・ステートメント

フィージビリティ・ステートメントは認証の中でも開発初期段階において要求される文書であり、現状の技術で現実的に開発できるか判断するためのものである。大きく以下の 3 つの要件が満たされることで発行される。

- 信頼性及び機能性の観点から、新技術が概念的に可能である（主な困難が特定されており、かつ有効な技術の実用によってそれらが解決可能であると判断された状態）
- 新技術のさらなる発展が期待される
- 新技術が技術要件（DNV RP-A203）[2-24] を満たす

以下に、下線で示した DNV-RP-A203 による技術要件についてまとめた。

【DNV-RP-A203 による技術要件】

DNV-RP-A203 は認証実行、意思決定の評価に関する一般的な基準であり、以下の項目に関するものが挙げられている。

- 技術の使用方法
- 用いられる環境
- 要求される機能およびその許容基準

DNV-RP-A203 で紹介されている技術認証プロセスは、脅威評価（Thread Assessment）を中心に技術要求事項を定め、想定されるリスクが許容範囲になるまで繰り返し技術の更新を

することで、安全性を担保しようとするものである。

技術が持つ脅威を評価する前に、まずその技術に対する評価（Technology Assessment）が行われる。すなわち新技術に含まれている要素を特定し、それらの重要課題と不確実性は何かを特定することである。技術要素と、それらの主な課題、不確実性を記した一覧表をアウトプットとして提出する。

一般に、技術の中にいくつかの新しい要素があり、不確実性はそこから生じると考えられる。運用される分野が既知か、および使用する技術そのものの実績によって、以下の表 2-6 のように技術の等級付が行われる。また、図 2-20 では、技術評価の違いにより仕様適合認証取得までの流れが変化することを表している。

表 2-6　技術の等級付（分野の新規性／技術の実績）

技術の等級	技術の信頼性	運用状況（既知の分野）	運用状況（新規の分野）
1	新たな技術的不確実性がない	実証済み	
2	新たな技術的不確実性を伴う	実績不足	実証済み
3	新たな技術的な課題がある	新規・未完成	実績不足
4	新たな厳しい技術的な課題がある		新規・未完成

出所）DNV-RP-A203 [2-23] より三菱総合研究所作成

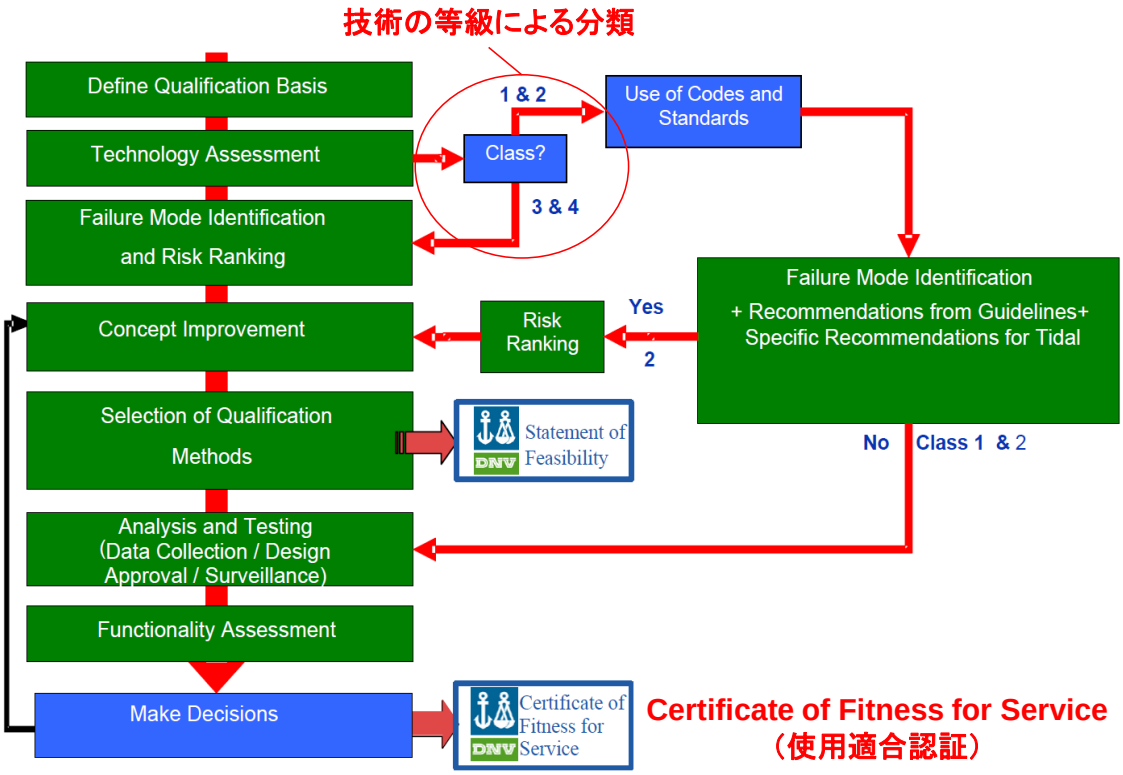


図 2-20　仕様適合認証取得までの流れ

出所）Certification of Tidal and Wave Energy Converters（DNV, 2012）[2-25]より三菱総合研究所作成

その後、各技術に対し主な課題・不確実性の同定（HAZID: Hazard Identification）が行われる。HAZID は、その分野の専門家および有識者を含むワークショップを行うことで、ハザードを洗い出すプロセスである。新たな技術要素によって内在する故障メカニズムに関連する、故障モードの同定と、関連するリスクの評価を行う。ここでのリスクは、故障確率と結果によって定義される。

ここまで終了した時点ではじめて脅威評価が行われる。脅威評価は、図 2-21 の流れで評価される。この循環によって、許容可能な範囲までリスクを低減していくことを目的としている。ここで、故障モード表の例を図 2-22 に示す。

故障による結果は以下に分類される。

- 技術そのものの機能への影響
- 運用への影響
- 安全、健康、環境（SHE）
- 周辺や接続されているシステムへの影響

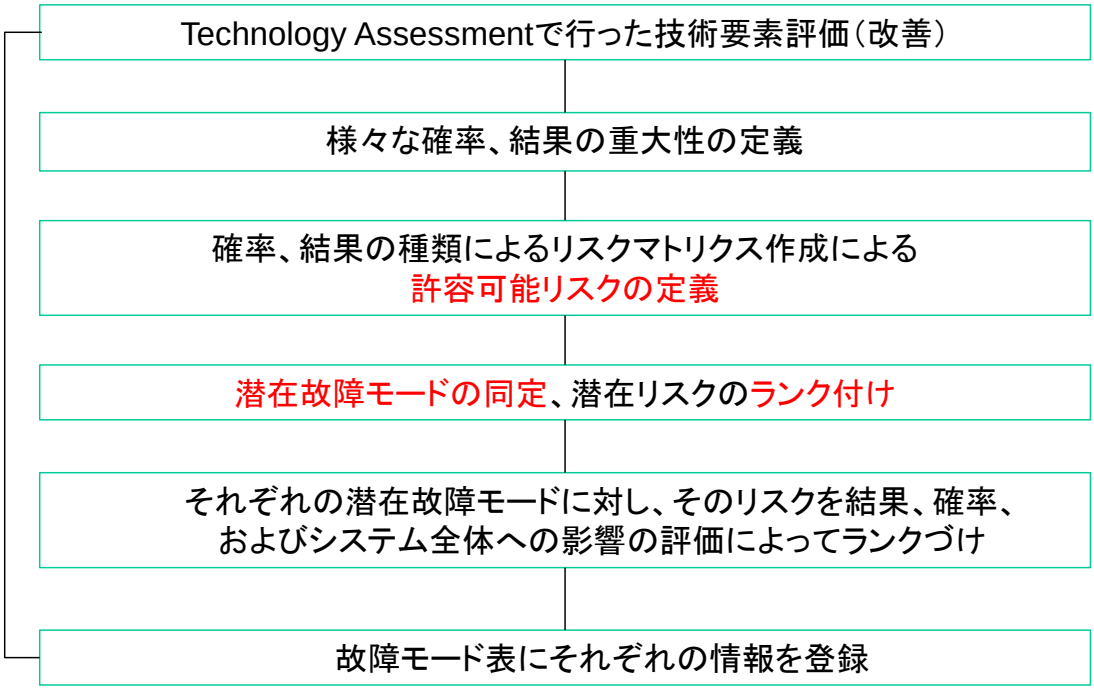


図 2-21　リスクの許容可能範囲までの低減手順

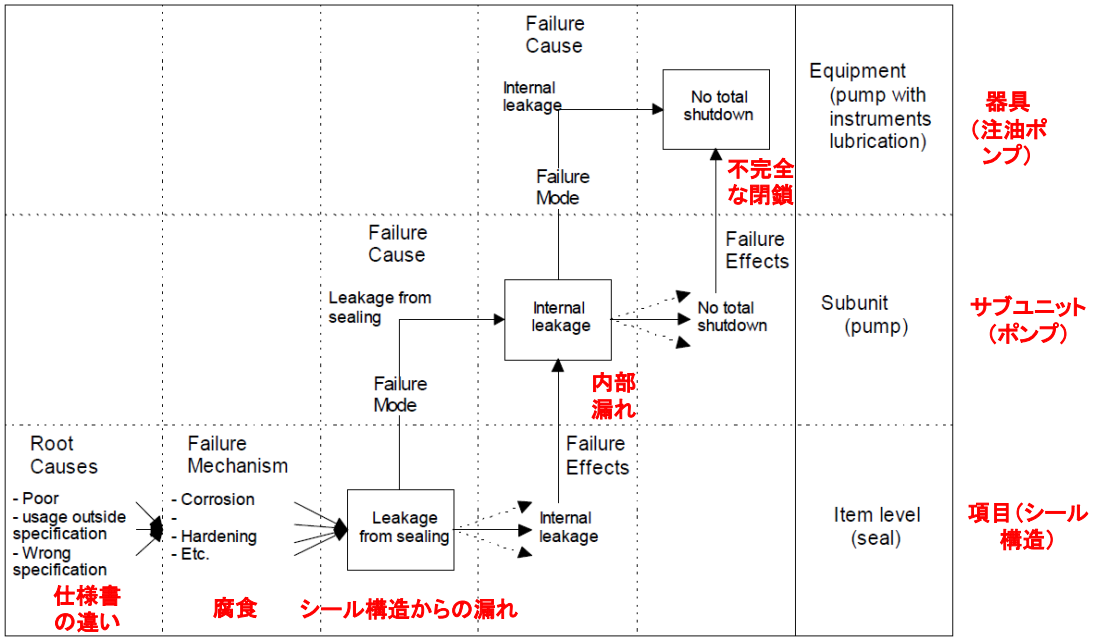


図 2-22　故障モード表の例

出所）DNV-RP-A203 [2-24] より三菱総合研究所作成

ウ）　プロトタイプ認証

プロトタイプ認証は、プロトタイプ試験を可能にするために発行されるものである。この認証は、Statement of feasibility, Design assessment, Fitness for purpose and manufacturing surveillanceが規定の場所や条件においてうまく実行された状態を前提としている。

実際に出力や負荷が測定され、装置の設置場所に関しても記載する必要がある点が、フィージビリティ・ステートメントでの要求事項と異なる点である。有効期間は3年とされている。

プロトタイプ認証は以下の項目を達成することで発行される。

- プロトタイプデザイン評価（C-Design Assessment）
- プロトタイプ製造調査
- 設置調査
- 最終製品検査、試運転前検査
- 年間定期検査

なお、前述のとおり、EMECでの実証実験を行う際の許認可は、プロトタイプデザイン評価（C-Design Assessment）のみを完了することで得ることができる。

エ）　型式認証

波力発電・潮流発電分野における型式認証について指針が示されている DNV および GL の文書は現在のところ存在しない。ただ、洋上風力発電については GL がガイドラインを作成しており[2-26]、その概要について紹介する。

特に発電形態が多種に渡る波力発電に関しては、認証する型として一様に決まることは考

えにくい。ただ、認証時に要求される項目としては、波力発電・潮流発電分野にも共通して考えられる事項も多いことが予想される。洋上風力発電における型式認証のプロセスについても、今後の動向予測の参考になり得ると考えられる。

型式認証において要求される事項について、以下の図に示す。

図 2-23　洋上風力発電設備の型式認証、およびプロジェクト認証の流れ

出所）Certification and Standards for Wind Turbines（GL, 2013）[2-23]

また、洋上風力発電設備における、コンセプトの評価からデザインアセスメントまでのプロセスを以下の図に示す。

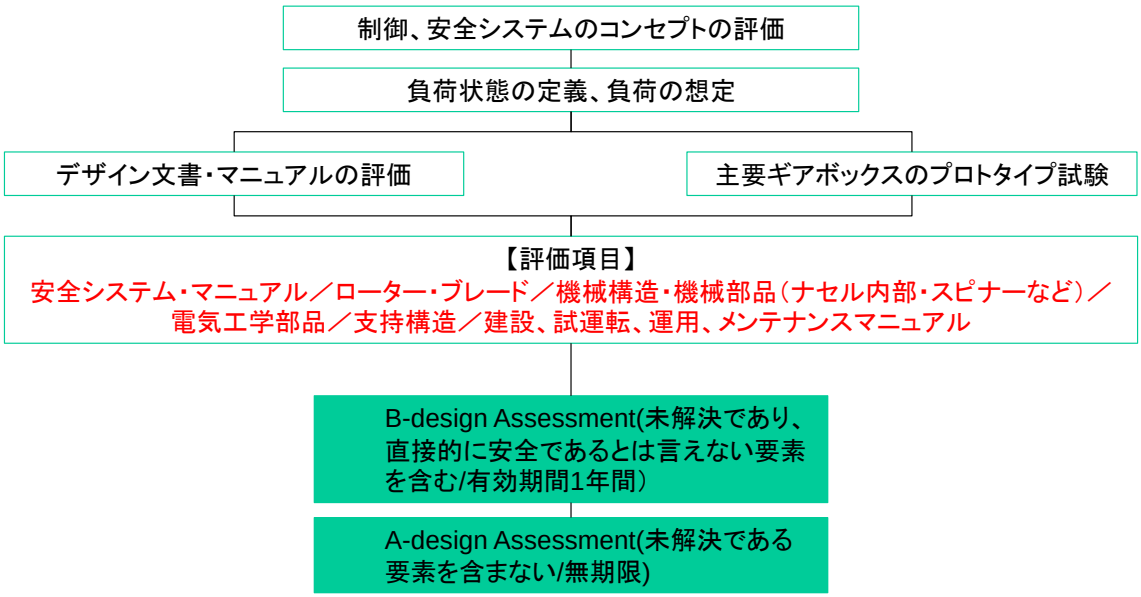


図 2-24　洋上風力発電設備のデザインアセスメントまでの流れ

出所）Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines（GL, 2005）[2-25] より三菱総合研究所作成

オ）　プロジェクト認証

波力発電・潮流発電分野におけるプロジェクト認証について指針が示されている DNV および GL の文書は現在のところ存在しない。ただ、型式認証同様、洋上風力発電については GL がガイドラインを作成しており[2-26]、その概要について紹介する。

プロジェクト認証が型式認証と違う点は、サイトの評価およびサイトに特化した設計評価が必要となることである。また製造から輸送、設置、試運転まで監督する必要があること、そして定期モニタリングが必要となることである。

波力発電・潮流発電分野にも共通して考えられる事項も多く、基本的にはこの洋上風力のガイドラインを踏襲することが予想される。ただ、ナセルやローター翼などが空気中ではなく水中に設置される場合を考慮すると、監督項目として水密性等が新たに追加される可能性が示唆される。また、定期モニタリングの手法も、水中でのモニタリング法を工夫する必要が出てくると考えられる。

c. DNV・EMEC ガイドラインにおける安全要求事項

ア） Guidelines on design and operation of wave energy converters （DNV）

DNV の波力発電に係るガイドラインである Guidelines on design and operation of wave energy converters（2005）[2-27] の 11 章以降には、各サブシステムおよびプロジェクトの各フェーズにおいて考慮すべき事項を中心に記載されている。

本ガイドラインの記載事項について、考慮すべき項目および危険事象、それに対する要求項目に分けて整理した。

表 2-7　波力発電設備において考慮すべき項目

フェーズ／サブシステム	考慮すべき項目	考慮すべき（危険）事象	要求事項
材料選定	気温		日平均最低気温を基準とした材料選定
	部材（鉄材・コンクリート）強度の不足		材料の等級付け
			適切な板厚設計
腐食防止	構造にかかる水滴やしぶき	部材の腐食	コーティング（カソードの防護）
		部材の腐食	厳しい環境を考慮した腐食許容限界の設計
	疲労	部材（特に鉄鋼原料）の腐食	
	内部温度	部材（特にコンクリート）の腐食	
	炭素繊維と金属部材の接触	電解腐食	
	海水	チェーンや繊維ロープの腐食	外装による防護
構造設計基準	波	構造物の損壊	装置の特徴や海況に応じた波力の許容限界の設定
	温度や湿度（熱負荷）	火災・爆発	
	ファームに接近する作業船や近くを航路として通過する	構造物の損壊	発電装置の船舶への可視化
			航路表情報の活用など

フェーズ／サブシステム	考慮すべき項目	考慮すべき（危険）事象	要求事項
	落下物による衝撃		耐久性・割れ・緊張・たわみ振動の許容限界の設定
	漂流がれき等		
	洪水・津波・高波		
	その他の異常な外部環境		
	脆弱な部材の組み合わせによるき裂	鋼材の脆性破損・不安定な挙動	慣習・経験・試験に基づいた応力分布の推定
	局所的な負荷をもたらす設計		
	溶接の欠陥		
	プラスチックの塑性変形		
	シェル構造の座屈		
	複合材料における主原料のき裂	材料間からの流体の漏出、き裂による破砕	材質レベルでの故障メカニズムの考慮
			全体に影響を及ぼしうる細部の故障の考慮（全体に影響しないものは許容）
			接合部や接触面への注意（積層の接合、接着剤接合、機械的接合（ボルト等））
	接合部の脆弱さ	複合材の破損	かかりうる最大荷重の考慮
			繰り返し荷重や外部環境に対する静的特性の改良
			構造解析（FEM）の徹底
			異なる材質レベルでの解析を通した局所的な構造応答の解析（繊維、母材、コア等）
			校正材料間の材質の不連続性の考慮 母材のき裂がもたらす剛性パラメーターの減少の考慮
基礎 構造設計			部分係数設計法の使用
			土壌の変形の考慮
			サイト特有の情報に合致した基礎構造の設計 （波力装置のタイプやサイズ、土壌の一様性、海底地形の状態）
			土壌のせん断強度に適応した材質係数の使用
係留 システム	極端な海況	耐用年数の減少	荷重係数の考慮
		隣接したプラットホームへの衝突	（200m を超える深海域）係留の動的解析
	疲労	装置の転覆や沈没	
	漁具	チェーンの腐食	適切な防護計画の設計
		コーティング破損	
		係留システムの故障	水槽実験と組み合わせた時系列シミュレーションが必要

フェーズ／サブシステム	考慮すべき項目	考慮すべき（危険）事象	要求事項
		種々の事故	（水平方向の単一方向の荷重である場合）いかり型のアンカーの適用
			（緊張係留システムを用いる場合）Drag-in-plate アンカー（推奨設計 RP-E302）の適用
送電ケーブル	流れ、波、浮体装置による荷重	電力、通信信号の伝送停止	ケーブル全体に対する負荷解析
	ケーブルルート上の障害物（航路、漁場、岩場、強流、流砂地点）	ケーブルの破断	ケーブルの埋設
	漁具		
防水性・安定性	防水加工の損壊	浸水もしくは部分的な浸水	変化に対する適切な制御
	バラストの不注意による変化	（メンテナンス中等）作業員の海への落下	ポンプの提供、拡張接続の配管の考慮（けん引輸送時や設置時、メンテナンス時は特に）
電気・機械設備	排熱除去能力の減少	爆発・火災	装置内環境状態の早期設計段階における考慮
	爆発性ガス・バッテリーの細流充電		適切な器具の使用や遠隔監視、制御
			過度の装置内圧力状態を外部に開放するシステム
	温度、湿度、塩分、振動、急激な衝撃、装置の動き・傾き	装置の故障	
	海水、水分の存在	ブレーカー遮断	配置、電圧レベル、供給安全性を考慮
	電磁気による干渉	回路のショート	バックアップ回路の設置
	（電気ケーブルの）熱による損傷	塩化水素の沈着による腐食率増加	適切な清掃の徹底
		電気絶縁材の抵抗の減少	
		装置の故障	建設時だけでなく運用時･メンテナンス時も考慮した装置の電気システムのネットワークの考慮
	（浮体の場合）装置の不測動作や衝撃		陸や海底に固定された装置では起こらない動作や衝撃による荷重がかかることの想定
			洋上の電気装置への油入変圧器の使用禁止（IEE 推奨）
	バッテリーの過充電		（バッテリー使用時）換気や過充電の監視
	パイプへの繰り返し荷重・振動		自由度の高い部品の使用、衝撃吸収部材の追加
	装置内の破片やがれき		清掃の徹底

フェーズ／サブシステム	考慮すべき項目	考慮すべき（危険）事象	要求事項
	パワーテイクオフへの負荷（圧力格納器やピストン棒の疲労、ピストン棒の座屈、シール部・ピン・ベアリング表面の摩耗、酸化による油圧油の劣化、破片の蓄積、バクテリア成長、流体の粘性の増加）	パワーテイクオフ（Hydraulic Systems）の故障 ※水圧シリンダー、ピストン、配管、バルブのブロック、蓄圧タンク（accumulator）、水圧ポンプ等	フィルターの調整 メッシュサイズの考慮（清掃しやすさの考慮） 熱発生や限界温度の考慮（出力カットオフ調整等）
	エンジンマウントシステムへの負荷	タービン部分の故障 ※ベアリング、シール、潤滑油システム、制御システム、出力制御システム、振動、温度、圧力、騒音低減システム、ろ過システム等	発生源項目に対する FMEA の考慮
	ギアボックスへの負荷	ギアボックスの故障	振動、疲労、異常時の荷重を考慮した設計
制御・監視システム	振動（波による衝撃、タンク内の跳ね回る水、局所的な振動・衝撃等）	システムの損壊	電磁環境両立性
	温度変化	爆発・火災	消火器
	爆発性ガス・バッテリーの細流充電		防火要求項目（OS-D301）
	大気圧（密閉空間で変動するもの）	システムの損壊	換気路、避難路の確保
	電気や水圧、光（光ファイバー装置）や電力供給力の品質や変動	電力の安定供給不可能	
	風、雨、雪、氷、ちり 騒音、機械の衝撃、しぶき	システムの損壊	
		不具合の発生、連鎖	不具合が見つかりやすいような明快なシステム設計
			不具合時の行動マニュアルの策定（警告、ストップ、シャットダウンなど）
			冗長性（バックアップ性）を持たせたシステム設計
			システムストレステスト、ソフトウェアテスト、検証の徹底

フェーズ／サブシステム	考慮すべき項目	考慮すべき（危険）事象	要求事項
			ローターの速度超過抑制システム
			サージ（異常電流）抑制システム
緊急時対応		人の落水	チェックリストマニュアルの作成
		外部構造物との衝突	病院とのコンタクト
		係留システムの故障	連絡情報先の把握

イ） Guidelines for Design Basis of Marine Energy Conversion Systems （EMEC）

EMEC の海洋発電の設計に関するガイドラインである Guidelines for Design Basis of Marine Energy Conversion Systems（2009）[2-28]の Annex A では、BERR（Business, Enterprise and Regulatory Reform, UK）によって定められた製品の規格に関する文書”Essential health and safety requirements relating to the design and construction of equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres”より抜粋した、安全のための要求事項を掲載している。表 2-8 に主要な要求事項を整理する。

表 2-8　BERR による製品安全のための要求事項

	要求事項
A	装置や防護システムは、危険な状況ができるだけ起きないようにするために、起こりうる操業過失（人為ミス）を分析した後に設計、製造されていなければならない。
B	合理的に考えて予測可能な誤用は考慮されていなければならない。
C	装置や防護システムの建設に用いられる部材においては、予測可能な操業中の応力が考慮されていなければならない。
D	部材の特性や他の部材との組み合わせによる予測可能な変化が、与えられている補償の減少を引き起こさないように、部材を選択しなければならない。特に、部材の腐食や摩耗耐性、電気伝導率、衝撃強度、経年劣化耐性や温度変化による影響は十分に考慮されなければならない。
E	装置や防護システムは、以下の項目を満たすように設計、製造されているか？ （a）直接的、もしくは間接的な接触によって引き起こされる、肉体的な危害・その他の危害を避けること （b）人が立ち入る部分の表面温度や危険を引き起こしうる放射線が生成されていないこと （c）電気機器でないものの危険の除去 （d）予測可能な過荷重の状態が危険な状況を引き起こさないことの保証
F	装置への危険な過荷重状態が起こらないよう設計段階で対処していなければならない（過電流時のカットオフスイッチ、温度リミッタや差圧スイッチ、流量計、時間差中継、過速度モニタ、類似のモニタリング機器等による統合的な測定、規制、装置の制御の手法など）
G	環境状況の変化、外部からの電圧の存在、湿度、振動、汚染や他の外的影響に対しても、完全に安全な状態で意図された機能が発揮できるように、装置や防護システムの

	設計、建設をしなければならない。
H	装置の部品は、意図された機械的、温度的応力や、存在する、もしくは予測可能な腐食による攻撃に耐えることができるよう、適切に使用されなければならない。
I	安全装置は、操業に必要などんな測定器や制御装置とも独立して機能しなければならない。
J	危険な状況が起こる可能性は非常に低いと保証される適切な技術手法により、可能な限り安全装置の故障は十分かつ迅速に特定されなければならない。
K	一般的に、電気回路においては、二重安全装置の原則が適用される。安全に関連するスイッチは一般に、中間にあるソフトウェアのコマンドなしに、関連する制御装置を直接作動させなければならない。
L	安全装置の故障が発生した時には、装置や防護システムは最大限確保されなければならない。
M	安全装置による緊急停止制御は、可能な限り再起動に適していなければならない。新始動のコマンドは、再始動が意図的にリセットされたあとのみでの通常操業時において有効にすべきである。
N	ソフトウェアによって制御される装置の設計においては、防護システムや安全装置、特別アカウント等が、プログラムミスの欠陥によって生じるリスクを考慮していなければいけない。
O	安全性を妥協しない前提で、自動部分とリンクした部分であっても手動操作は可能でなければならない。
P	緊急シャットダウンシステムが作動させられた時、累積したエネルギーは可能な限り迅速かつ安全に分散されるか、もしくは危険の構成要素にはならないように隔離しなければならない。
Q	装置や防護システムは適切なケーブルや電線管の入力部に適合していなければならない。
R	装置や防護システムが、他の装置や防護システムとの組み合わせによって使用される場合、それらのインターフェースは安全でなければならない。

3）米国

米国内においては海洋エネルギー（波力発電、潮流発電、海流発電）に特化した技術基準等は整備されておらず、IEC 専門委員会（TC：Technical Committee）の場において議論を進めている状況である。また、許認可の管轄や手続き等についても、海洋エネルギーに特化した明確な規定はない。

以下では、米国における洋上風力の事例等も踏まえ、海洋エネルギーに関する技術基準等および許認可体系等について述べる。

a. 米国における技術基準等の整備状況

米国は、IEC の波力発電・潮流発電等に関する専門委員会 TC 114 "Marine energy - Wave, tidal and other water current converters"[2-20]に、P メンバー[5]として参画しており、議長国を務めている（幹事国は英国）。なお、米国の国内委員会は、米国規格協会 ANSI（American National Standards Institute）が務めており、IEC TC 114 US Technical Advisory Group を立ち上げ、米国内の利害関係者間の調整を図っている。IEC TC 114 の詳細については、2.1.2（1）1）を参照のこと。

また、石油・ガス業界（Oil & Gas）の業界団体である API（American Petroleum Institute）では、洋上におけるプラットフォームに関する推奨規格を規定している。参考として、洋上風力発電設備における水面下の支持物等に関しては、以下のような規格等が適用されており、海洋エネルギーに関しても以下の規格類が準用されるものと考えられる。

- ISO 19900, General requirements for offshore structures
- ISO 19902, Fixed steel offshore structures
- ISO 19903, Fixed concrete offshore structures
- ISO 19904-1, Floating offshore structures—monohulls, semisubmersibles and spars
- ISO 19904-2, Floating offshore structures—tension leg platforms
- API RP 2A-WSD, Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore steel platforms—working stress design.

なお、洋上風力に関しては、ABS（American Bureau of Shipping）、BS（Bureau Veritas）、DNV GL が、上記規格等を補足するため、各種のガイドライン等を発行しているが、これらは米国内においてコンセンサスを得たものとなりえていない。

なお、技術基準が未整備であるために、例えば、以下のような事例が報告されている。[2-29]

[5] TC におけるメンバーシップには、業務に積極的に参加する P メンバー（Participating Member）と、オブザーバとして傘下する O メンバー（Observing Member）の２つがある。2014 年 3 月時点において、TC 114 における P メンバーは 14 ケ国（日本を含む）、O メンバーは 9 ケ国である。

ワシントン州の Snohomish County Public Utility District（SNOPUD）では、Admiralty Inlet Pilot Pilot Project において、着床式の潮流発電の設置を検討している。この潮流発電設備は、1MW の発電容量を持ち、海底送電ケーブルにより Whidbey 島に系統連系する計画である。この潮流発電設備と Pacific Crossing 社所有の海底光ファイバケーブルとの離隔距離が 175～235m で計画されており、Pacific Crossing 社は、離隔距離が小さく危険であるとして異議を唱えている。

2013 年 10 月時点では、潮流発電装置と既存の海底通信ケーブルとの安全距離を定めている技術基準等は米国に存在していない。洋上風力発電については、FCC（Federal Communications Commission）が離隔距離を定めている（洋上風力発電設備と海底通信ケーブルとの離隔距離は 500m 以上である必要がある）。潮流発電設備についても FCC が委員会を設置して、基準策定に向けて検討中である。

b. 米国における許認可等の所掌の状況

米国における洋上のエネルギー関連設備については、海域に応じて、連邦政府または州政府が規制、許認可を行っている。連邦政府、州政府の具体的な所掌区分は以下のとおりである。

- 連邦海域（３海里以遠の海域）については、連邦政府が所轄する。
- 州海域（３海里までの海域であるが、テキサス州およびメキシコ湾では約 10.5 海里以内）

連邦海域に関する規制と許認可は、米国内務省 DOI（Department of Interior）下の BOEM（Bureau of Ocean Energy Management）および BSEE（Bureau of Safety and Environment Enforcement）[6]、または米国エネルギー省 DOE（Department of Energy）下の FERC（Federal Energy Regulatory Commission）が担っている。BOEM および BSEE は外洋大陸棚（OCS：Outer Continental Shelf）における風力発電や太陽光発電等（Non-Hydrokinetic）、FERC は外洋大陸棚における波力・潮力・海流発電等（Hydrokinetic）と、設備によって所轄が異なる。

2009 年に、連邦政府は、Code of Federal Regulations （CFR）として、30 CFR 285[7]「Renewable Energy and Alternate Uses of Existing Facilities on the Outer Continental Shelf」を発行した（その後、30 CFR 585 に改定）。この CFR は、洋上における発電設備の許認可のフレームワークを提供するものである。しかし、30 CFR 585 は、基準等の具体的な適用方法を示すものではなく、業界で受け入れられている慣例（”accepted industry practices”）を用いるよう事業者に指示している。しかし、この業界慣例のほとんどは、先行している欧州の事例に基づくものであり、構造上の安全の確保、設計の健全性等確認、業界慣例の確立は、事業者、BOEM および CVA（Certified Verification Agent）が、その場その場で臨機応変に対応しているのが

[6] BOEM および BSEE は、BOEMRE（Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement）を置き換える形で 2011 年 10 月に発足した。[2-30]（http://www.boemre.gov/）

[7] 「30」は「Title 30　－Mineral Resources」を、「285」は「PART 285」を意味する。

実情である。BOEM が設計・施工の最終計画を認可するものの、その認可プロセスは明確性と透明性を欠いたものである。[2-31]

CVA（Certified Verification Agent）とは、構造上の安全性を評価することを政府により認定された認証機関であり、30 CFR 585 では、設備の設計、製作、施工、運営、解体に関する評価を CVA に委ねている。具体的には、米国マサチューセッツ州沖で計画されている「Cape Wind 事業」においては、ノルウェーの DNV（Det Norske Veritas）が CVA を務めている。[2-32]

なお、30 CFR 585 の§585.705 では、CVA に関し以下のように記述されている。

§585.705（どのような場合に CVA を使用しなければならないか）
設計に関する図書（Facility Design Report）、製作・施工に関する図書（Fabrication and Installation Report）、変更・修繕に関する図書（Project Modifications and Repairs Report）の調査および認証を CVA を用いて行わなければならない。
(a) さらに、以下の場合に CVA を用いなければならない。
(1) 設備の設計・製作・施工が、一般的技術慣例（accepted engineering practice）、Facility Design Report、Fabrication and Installation Report に適合していることを保証する場合。
(2) 補修および変更の工事が、一般的技術慣例に適合していることを保証する場合。
(3) プロジェクト全体およびその要素の、設計・製作・施工に影響するようなあらゆる事象・事故の速報を BOEM へ提出する場合。

以下、省略。

【参考】BOEMRE と USCG との協定

Memorandum of Agreement between BOEMRE and USCG [2-33]は、OCS（外洋大陸棚）への海洋再生可能エネルギー導入の際のリースの承認、および現地アセスメント計画、設置運用計画の承認のための合意である。基本的には BOEM は OCS における Non-Hydrokinetic な発電を管轄するが、本協定は新規に設置される海洋の発電設備、送電・変電設備すべてに対し該当する。既存の設備を使う場合は、改修の性質および程度により適応されるか判断する。2004 年の MMS（Minerals Management Service）との協定とも整合性をとっている。以下、項目別に箇条書きで整理する。

【BOEMRE と USCG の提携】
- BOEMRE は国家環境政策法（NEPA: 42 U. S. Code 4321）に順じ、関連の文書の作成準備を担う。
- BOEMRE は NEPA 文書の認定プロセスの間、USCG（US Coast Guard）を協力機関として招待し、専門的知識を提供してもらう。また、NEPA 文書の作成の際、USCG は海上安全、海運、国家防衛、海洋環境保全の専門機関として参画する。USCG 側としては早めに参画（Scoping process の段階（40CFR1501.7）は特に）することが推奨さ

れている。

- BOEMREがState Renewable Energy Task Forceを設置し次第、USCGも加入予定。USCGは利権の申請書（RFI）および規制通知（Call）などをBOEMREが用意する際、およびリースや許認可申請の審査の際において、専門知識を与える役割を果たす。
- 船舶、設備、航路の安全航行および安全評価がリスクマネジメントにおいて重要である、特にNavigational Risk Assessmentにおいて協力することが求められている。
- BOEMREがリース発行（issue leases）、土地使用権（easements）、通行権（rights-of-way）を受け取った段階で、各機関の代表は連絡を取り合う必要がある。USCGは、BOEMREがNEPA文書を作成する際に迅速なアドバイスをすると同時に、リース発行、土地使用権、通行権を発行するかどうかを決め提案する（その際、BOEMREはあくまで主体的ではない）。
- 2団体間での連絡による時間遅れを発生させないようにする。同時に、規制に重なる部分がないようにする。

【海洋設備に係る船（設置・運用・保守点検用の船）の規制】

- USCGに検査され認証された船であれば、USCGの規制があればその規制を適応する。
- USCGの規制がない場合、USCGが反対しなければ、BOEMREが規制及び安全管理要求が適応される。USCGが反対した場合、船の安全性を保つという目標のもと、規制改正に協働する必要がある。

【履行プロセス】

- BOEMREは未承諾のリースや許認可申請もしくはRFI, Callその他計画の告示の受領をUSCGに報告し、USCGがそれを承認する
- リースや許認可申請および関連資料を司令部（CG-55）へ送り、司令部は設置されるエリアを担当するUSCGオフィスにそれらのコピーを送る
- USCGがPOC（Point of Contact）を用意し、BOEMREとの直接連絡を取る。USCG推奨を含めた最終パッケージをBOEMREに各フェーズにおいて提供する。

(2) 日本

ここでは、潮流発電・波力発電の規格は、浮体式洋上風力発電とも共通する部分が多いことを踏まえ、国内の浮体式洋上風力発電に係る安全基準の動向として、主に、平成 24 年 4 月に制定された「浮体式洋上風力発電施設技術基準」（国土交通省海事局安全基準課）について、同基準及び、国土交通省発表資料（2012 年）[2-34]、国土交通省資料[2-35]に基づき示す。

1）浮体式洋上風力発電施設技術基準の背景

国土交通省海事局では、有識者、関連事業者、関係省庁等からなる委員で構成される浮体式洋上風力発電施設の安全性検討委員会を平成 23 年 8 月に設置し、浮体式洋上風力発電施設特有の課題である漂流、転覆・沈没、浮体・係留設備の安全性に関する技術的検討を実施している。検討の背景は次のとおりである。

- 浮体式洋上風力発電の普及拡大のためには安全性の確保が不可欠であるが、発電施設が海上に浮遊しており、支持構造・漂流の有無等が陸上や海底に基礎を持つ風力発電施設と全く異なること。
- 我が国は台風、地震、津波等、他国とは頃なる外部条件を有していること。
- 我が国の特有の状況を踏まえ、浮体式風力発電特有の動揺の解析・制御方法の開発等について検討する必要があること。

また、浮体式洋上風力発電施設の安全性確保に必要な要件をとりまとめ、平成 24 年 4 月に船舶安全法に基づき「浮体式洋上風力発電施設技術基準」を制定している（これを受け、浮体式洋上風力発電施設は、船舶安全法の規制下に置かれた）。

2）浮体式洋上風力発電施設技術基準の概要

浮体式洋上風力発電施設技術基準の目次構成は図 2-25 に示すとおりである。この基準では、以下の状況を受けて、日本の船級協会[8]である一般財団法人日本海事協会による「鋼船規則」や「国際電気標準会議（IEC）」の風力発電に係る規格（陸上、着床）をベースとしている。

- 浮体式洋上風力発電施設で利用される浮体構造物は、造船技術を応用して建造される海洋構造物の一種である。海洋構造物は石油掘削リグ等として用いられており、その技術基準は国連の専門機関である国際海事機関（IMO）にて基準が制定されている。
- 陸上風力発電施設や着床式洋上風力発電施設については、国際電気標準会議（IEC）に

[8] 船舶や海洋構造物及びそれらに搭載される設備・機器に対して「技術上の基準を自ら定め」「設計審査、材料の確保、搭載される設備・機器の検査及び建造に係るあらゆる過程での検査を行い」「就航後も定期的に検査を行う」ことで、船舶や海洋構造物等が基準を満足していることを証明する第三者機関

て国際標準が制定されている。

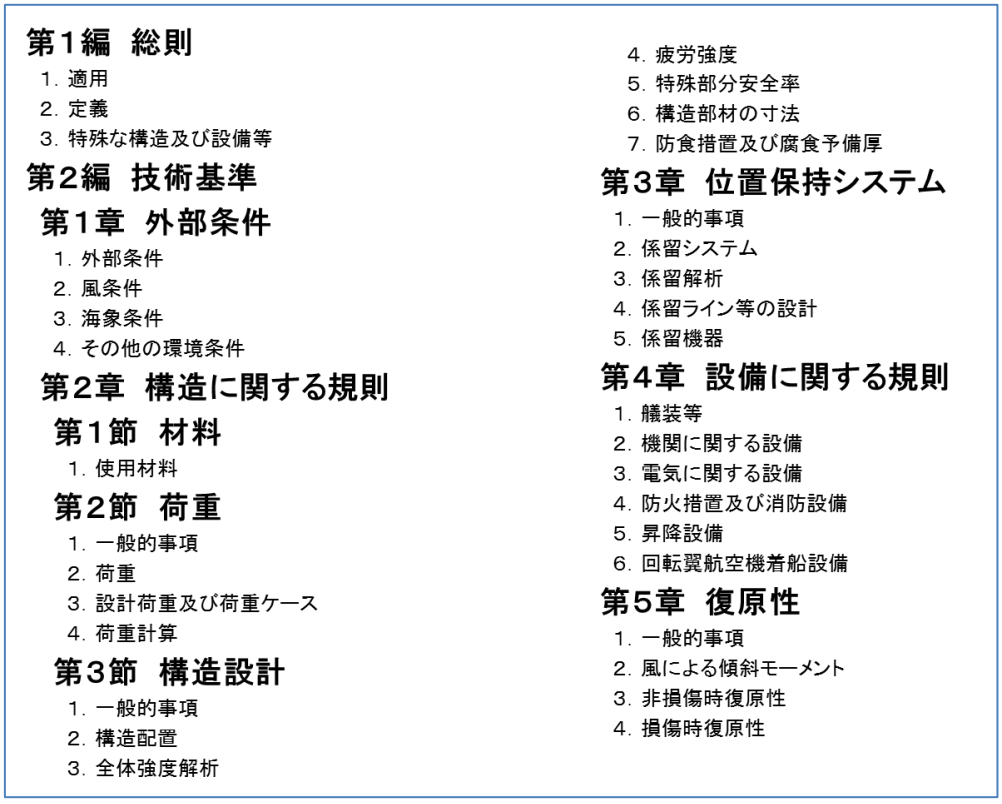


図 2-25　浮体式洋上風力発電施設技術基準の目次構成

出所）「浮体式洋上風力発電施設技術基準」（国土交通省海事局安全基準課）[2-36]

ここでは、国土交通省資料にてポイントとされている次の項目に曳航・設置を追加して、概要を示す。

- 外部条件
- 疲労強度
- 腐食対策
- 復原性
- 係留システム
- アンカーチェーン

a.　外部条件

通常の風、波浪のほか、50 年間に 1 度起こりえる暴風、波浪に堪える構造及び強度を有すること。また、地震、津波等を考慮するとともに、浮体構造物と風車支持構造物（タワー）に作用する荷重の連成や風車の翼角制御を行う浮体構造物の動揺励起を考慮することを規定している。この要件では、浮体式洋上風力発電施設として考慮しなければいけないものとして、波荷重と波作用・風作用の連成、翼角制御に伴う動揺励起を規定している。

b. 疲労強度

疲労強度として、繰返し応力を受ける部材の十分な強度確保（繰返し応力の大きさ、繰返し数、平均応力、部材形状等を考慮）や疲労強度解析の前提（浮体施設及びタワーの設計において考慮される設置海域に基づくこと）、設計寿命（浮体施設及びタワーの設計寿命または 20 年のいずれか大きい方の値以上）などが一般的事項として規定されている。また、疲労強度評価として、応力集中部・係留装置からの反力を受ける箇所・結合部を評価することや、あらゆる種類の繰返し荷重を考慮することを原則とすること等が規定されている。

c. 腐食対策

船舶では一定の期間ごとの造船所にて修繕・メンテナンスを行われるが、沖合に設置される浮体式洋上風力発電施設は、このようなメンテナンスは困難であることを考慮し、同様の環境下にある海洋構造物の基準をベースに規定されている。この際、浮体施設及びタワーの想定供用機関、保守方法、腐食環境などを考慮した適切な腐食対策及び構造部材が曝される腐食環境に応じた適切な腐食予備厚を有することが規定されている。

d. 復原性

復原性についても、海洋構造物の基準をベースに規定されている。このなかで「想定される損傷範囲を設定し、その損傷範囲内において一区画浸水でも浮力・復元性を確保するための構造とすること」とされているが、これは 2011 年 11 月にノルウェーの試験機が悪天候により電力ケーブル引込みパイプから内部浸水して沈没した事故を踏まえて規定されている。

e. 係留システム

係留システムは極めて重要であり、係留が外れ施設が漂流することになれば、付近を航行する船舶に危険を及ぼすことになる。そのため、長年の実績に裏打ちされた石油掘削リグ等の海洋構造物の基準をベースに規定されている。

具体的には係留ラインの強度及び疲労強度、海底係留点（アンカーなど）の保持力に対し、安全率（表 2-9）を設定し、係留ライン破断時（過渡状態も含む）にも、1 以上の安全率を有することを規定している。

f. アンカーチェーン

海水による腐食や海底接触点における磨耗を考慮し、使用期間を踏まえた適切な予備代等について規定している。

g. 曳航・設置

浮体式洋上風力発電施設の曳航・設置・アクセス・保守及び修理で想定される全ての風条件、海洋条件及び設計条件を考慮しなければならないと規定されている。また、考慮すべき最大限の風条件及び海洋条件が風力発電設備に対する重大な荷重を発生させ得る場合はこれらの条件を設計において考慮することや、浮体施設の接舷箇所における衝撃を考慮するこ

と等について規定されている。

表 2-9　係留ラインに係る安全率

状態	安全率	
	チェーン及びワイヤロープ	合成繊維ロープ
非損傷時		
動的解析を行う場合	1.67	2.50
準静的解析を行う場合	2.00	3.00
単一索破断状態（破断後の平衡状態）		
動的解析を行う場合	1.25	1.88
準静的解析を行う場合	1.43	2.15
単一索破断時の過渡状態		
動的解析を行う場合	1.05	1.58
準静的解析を行う場合	1.18	1.77

出所）「浮体式洋上風力発電施設技術基準」（国土交通省海事局安全基準課）[2-36]

3）安全ガイドラインについて

平成 24 年 4 月に国土交通省海事局では、「浮体式洋上風力発電施設の普及促進について」報道発表を行っている。この報道発表では、以下について示しており、今後、国際標準化の先導や、関連産業の国際競争力の強化及び浮体式洋上風力発電の普及拡大促進に資することが目指されている。

- 風力発電について、その導入促進に大きな期待が寄せられていること
- 浮体式洋上風力発電のポテンシャルは非常に大きいこと
- 福島沖において浮体式洋上風力ウィンドファーム実証研究事業が平成 24 年 3 月より開始したこと
- 浮体式洋上風力発電施設に係る安全性検討を行い、船舶安全法に基づき構造や設備の要件を定めた技術基準を制定したこと
- 同技術基準により、浮体式洋上風力発電施設の設計の際に必要となる技術上の要件を明確化したこと
- 同技術基準を基に、浮体式洋上風力発電施設の国際標準化を我が国が先導し、関連産業の国際競争力の強化及び浮体式洋上風力発電の普及拡大を促進すること

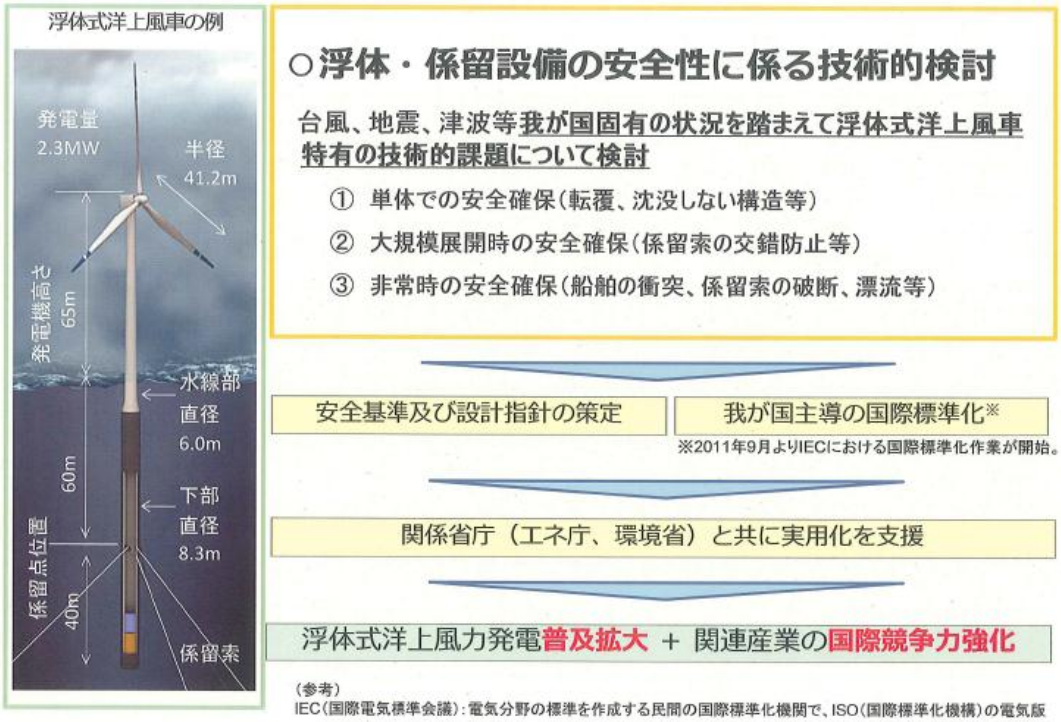


図 2-26　浮体式洋上風力発電施設の普及促進について

出所）国交省報道発表資料（2012 年 4 月）[2-37]

また、国交省海事局では、平成 25 年度末に向けて、引続き浮体式洋上風力発電施設に係る「安全ガイドライン」の検討が行われている。この検討では、浮体式洋上風力発電装置を的確な安全性と合理性をもって設計できるよう、技術基準を満たすための具体的な設計手法の指針がまとめられる。具体的には、「50 年間に想定される最大風速に耐えること」という技術基準に対して、「収集すべき気象データの種類、使用可能な計算プログラム、実験の方法」等が定められる。

4）民間による浮体式洋上風力発電施設に係るガイドライン

日本の船級協会である一般財団法人日本海事協会において、2012 年 7 月に「浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン」が発行されている。このガイドラインは、浮体式洋上風力発電設備の浮体構造・係留設備・タワーを主な対象とするもので、同協会の海洋構造物に関する鋼船規則と、着床式洋上風力発電設備に関する国際規格である IEC 規格（陸上、着床）をベースに、浮体式洋上風力発電設備に適した合理的な基準として、設計から製造中の検査及び稼働後の定期的検査までを網羅する内容となっている。

一般財団法人日本海事協会では、このガイドラインに従って、現在実施されている浮体式洋上風力発電に係る各種の実証事業において、設計審査・機器の検査・現場検査をそれぞれ実施し、全ての検査完了後に船級証書を発行している。また、浮体式海洋温度差発電に対して AIP（概念承認）を行うなど、海洋エネルギー発電への展開も行っている。

2.2 リスク評価と安全基準の検討

2.2.1 検討の基本的方針

(1) 検討の目標・内容

1.2 にて整理したとおり、電気事業法上、新しい発電技術として位置づけられる潮流発電・波力発電等の規制の在り方を検討するにあたっては、図 2-27 に示す検討手順を踏むことが有効と考えられ、本調査においては、「3.リスクの識別・評価と安全対策の整理」まで実施することを目標としている。

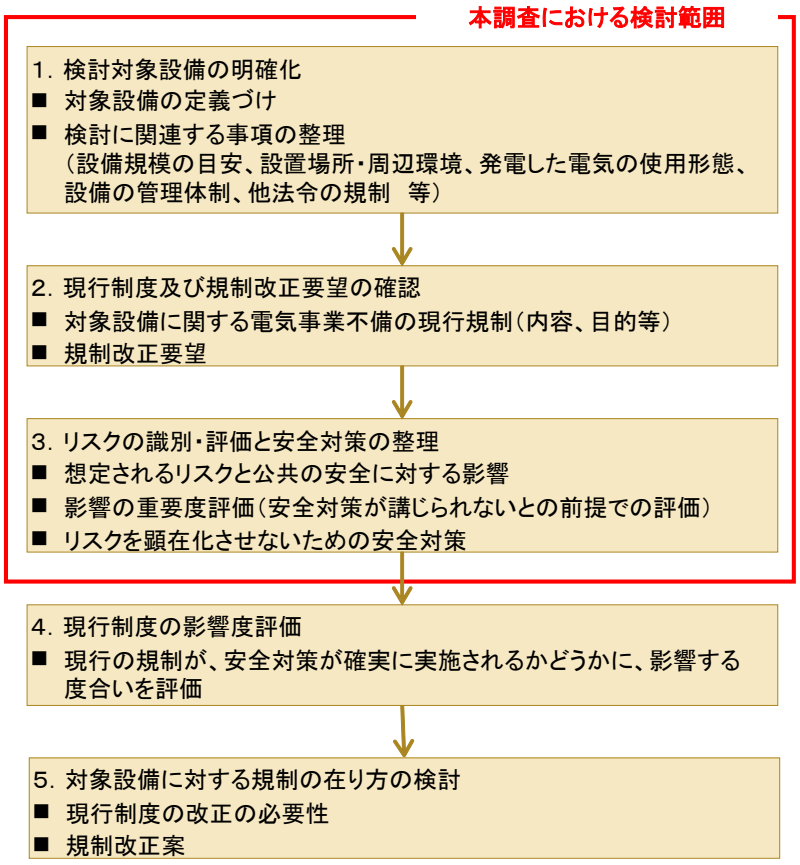


図 2-27 発電設備の規制の見直し検討手順

出所）「小型発電設備規制検討ワーキンググループ報告書」（平成 22 年, 経済産業省）[1-1] より作成

一方で、発電技術のリスク評価および安全基準の検討を行うにあたっては、具体的な発電装置（原動機を構成する要素や技術コンポーネント等）の設定や、参照する技術規格（IEC、JIS 等）が必要となるが、潮流発電・波力発電は、技術面、安全基準面で以下の不確実性、課題を有しており、現段階においては、定量的なリスク評価、安全基準の検討を行うことは困難な状況にある。

＜技術面の不確実性・課題＞

- 潮流発電および波力発電は、世界的に実用化に向けた技術開発途上にあり、いずれの技術が実用化し、商用段階に移行するか現状では判断が難しい。（2.1.1(3) 3）参照）
- 潮流発電は比較的技術が収斂されつつあるものの、複数の発電方式・装置が提案・開発されており、安全基準検討の前提とする装置を設定することが困難。（2.1.1(3) 6）参照）
- 波力発電は、より基礎的な技術開発が必要な段階にあり、装置の形状や用いられる技術が多種多様であることから、安全基準検討の前提とする装置を設定することは困難。（2.1.1(3) 6）参照）

＜安全基準面の不確実性・課題＞

- 現在、IEC TC114 において、海洋エネルギー発電設備に関する国際規格の策定が進められているが、技術仕様書（TS）の段階にあり、IEC 規格の発行には至っていない。（2.1.2(1) 1）参照）
- IEC-RE において、海洋エネルギー発電設備の認証スキームが検討されているが、まさに検討が開始された段階にある。（2.1.2(1) 1）参照）
- 海外においては、スコットランドの EMEC において、民間認証を活用した許認可制度が運用されているが、求められる認証フェーズはプロトタイプ認証の一部までとなっている。（2.1.2(1) 2）参照）

上記の状況を鑑み、本調査では、将来的に定量的なリスク評価及び安全基準の検討を行う前段階として、以下の 3 点について検討することを目標に設定した。

検討に当たっては、文献・ウェブ調査、メーカー・事業者へのヒアリング調査を実施し、基本的整理を行うとともに、1.3 にて示した「新発電技術を用いた発電設備に係る安全性検討委員会」において、大学、研究機関、認証機関それぞれの専門的知見を踏まえた議論を行い、取りまとめを行った。

＜本調査における検討内容・目標＞

① 想定されるハザード（危害を及ぼす前提となる状態）と危害の対象の整理
② 各リスクに対する安全対策の整理
③ リスク評価および安全基準の検討に係る留意事項の整理

(2) 対象とする開発段階

電気事業法においては、事業用工作物に対し、以下の 4 つの観点に基づく安全対策を要求している。

＜事業用工作物に求められる安全対策＞

- 事業用電気工作物は、人体に危害を及ぼし、又は物件に損傷を与えないようにすること。
- 事業用電気工作物は、他の電気的設備その他の物件の機能に電気的又は磁気的な障害を与えないようにすること。

・　事業用電気工作物の損壊により一般電気事業者の電気の供給に著しい支障を及ぼさないようにすること。
・　事業用電気工作物が一般電気事業の用に供される場合にあっては、その事業用電気工作物の損壊によりその一般電気事業に係る電気の供給に著しい支障を生じないようにすること。

（「技術基準（電気事業法第 39 条第 2 項）」より）

実海域における潮流発電・波力発電の実証試験・商用運転には、図 2-28 に示す開発段階が想定される。上記の電気事業法における事業用工作物に対する要件を踏まえると、電気事業法の対象範囲として、「設置作業」「運用」「撤去」が該当すると考えられる。

「海上輸送」については、上記要件に照らすと電気事業法の対象範囲外と考えられるが、特に大型の発電設備の場合には、人的被害も含めた影響が大きいと想定されることから、潮流発電・波力発電の導入促進にあたっては、重要なリスク評価項目であると考えられる。

従って、本調査においては、「海上輸送」も含めた 4 つの開発段階を対象に、想定されるリスクと安全対策の整理を行うこととした。

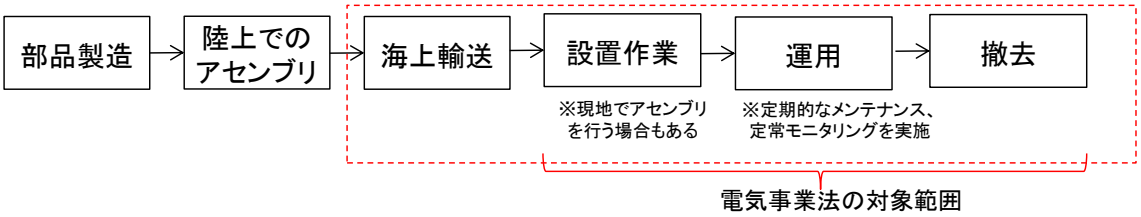


図 2-28　本調査で対象とする開発段階

(3) 対象とするリスクの範囲

潮流発電・波力発電に関連する事項について、一定の範囲において所管法令は決まっているが、油の流出や浮体構造物の安全設計など、電気事業法においても重要な位置づけにあり、所管法令の線引きが必ずしも明確ではない項目も存在する。

また、内閣府の規制・制度改革委員会において、再生可能エネルギーの導入促進に向けた規制・制度改革の検討が進められており、2014 年 4 月より陸上風力発電設備の審査が電気事業法に一本化されるなど、各種法手続きの簡素化・迅速化に関する動きが強まっている。

また、浮体式洋上風力において、浮体部分は船舶安全法、風力発電設備部分は電気事業法が所管法令となっているが、潮流発電・波力発電の特に実証段階においては、航路標識（ブイ）程度の小規模の装置も想定され、船舶安全法上の取扱いについては不明な部分が存在する。

上記を踏まえ、本調査では、電気事業法に基づくハザードの検討範囲は特に設定せず、想定されうるリスクを網羅的に整理することとした。

(4) 対象設備・構成要素

先述のとおり、潮流発電・波力発電は実用化に向けた技術開発途上にあり、多種多様な装置が開発・提案されているものの、2.1.1(3) に整理した発電方式や設置方式、発電装置・変電設備・各種制御装置等を格納する筐体（以下、ナセルとする）の位置により、表 2-10 の技術方式に整理される。本調査においては、表 2-10 の技術方式を想定し、ハザードを検討することとした。なお、潮流発電と類似する技術として、海流発電があり、NEDO の事業において水平軸型・水中浮遊式装置の技術開発が行われている（p.24 参照）。現在は要素技術開発の段階にあるが、将来的には水平軸型装置の実証試験が予定されていることから、海流発電についても考慮の上、検討を行うこととした。

表 2-10　潮流・海流発電、波力発電の技術方式

分類項目	技術方式		固有のハザード例※	共通のハザード例※
発電方式	潮流・海流発電	水平軸型		・異常な海象/気象条件による破損 ・疲労/腐食による破損 ・船舶との衝突 ・漂流物衝突、漁具接触による破損 ・付着物等による破損 ・ナセルの浸水 ・油の流出 ・電子機器の故障 ・作業員の人為的ミス ・遊漁者・ダイバー・観光客の接近 等
		垂直軸型		
	波力発電	振動水柱型		
		可動物体型		
		越波型	漂流物、海棲生物による詰まり	
設置方式	潮流発電	着底型		
		浮体型	係留索の切断	
	波力発電	沿岸設置型		
		着底型		
		浮体型	係留索の切断	
	海流発電	水中浮遊型	係留索の切断	
ナセル位置	潮流・海流発電	水中		
	波力発電	陸上		
		海面		
		水中		

※各分類項目で、他の技術分類では想定されない固有のハザード
※影響度の大小はあるものの、各分類項目で、他の技術にも想定される共通のハザード

ハザードを整理するにあたっては、各技術方式に固有のハザードと、技術方式間で共通するハザードの両方が想定される。例えば浮体式の発電装置における係留索の切断は固有ハザードの例として挙げられる。また、異常な気象／海象条件による破損や、疲労／腐食による破損は、技術方式間で共通するハザードの例として挙げられる。

ここで、想定される多くのハザードは、技術方式別に危害の程度や発生確率の大小は異なるものの、多くの技術方式で想定されうる（多くの技術方式で可能性がゼロではない）ハザードであると考えられる。例えば、着底式の潮流発電と比較して、浮体式の潮流発電は船舶との衝突リスクは高いと考えられる一方、着底式の潮流発電であっても、想定以上に水位が低下した場合には、船底との接触の可能性も考えられる。同様に、ナセルが水中に設置される装置は、ナセルの浸水リスクが高いと想定される一方、陸上や海面に設置される装置であっても、高波や台風来襲時に浸水する可能性も考えられる。

上記のとおり、技術方式間で共通するハザードが多いと想定されること、また、各発電方式・設置方式・ナセル固定位置別に条件を分離した場合、リスクと安全対策の分析が複雑となると考えられることから、本調査においては、技術方式別ではなく、海洋エネルギー発電装置全般について、想定されうるハザードを網羅的に整理することとした。その上で、技術方式別に、ハザードの有無や影響度、発生確率が異なると考えられるものについては、「技術方式別のリスク評価および安全基準に係る留意事項」として取りまとめることとした。

また、海洋エネルギー発電設備は、おおまかに下図に示す構成要素に分解される。本調査では各構成要素別に、ハザードの整理を行うこととした。

なお、変電設備については、ナセル内に設置される場合と、洋上変電所を別途建設する場合が考えられる。洋上変電所については、欧州の石油・ガス産業においては既存技術であること、我が国においても、福島県の浮体式洋上風力発電実証事業においても建設事例があることから、本調査においては検討対象外とした。また、水中に変電設備を設置する場合については、ナセルと同等と扱った。

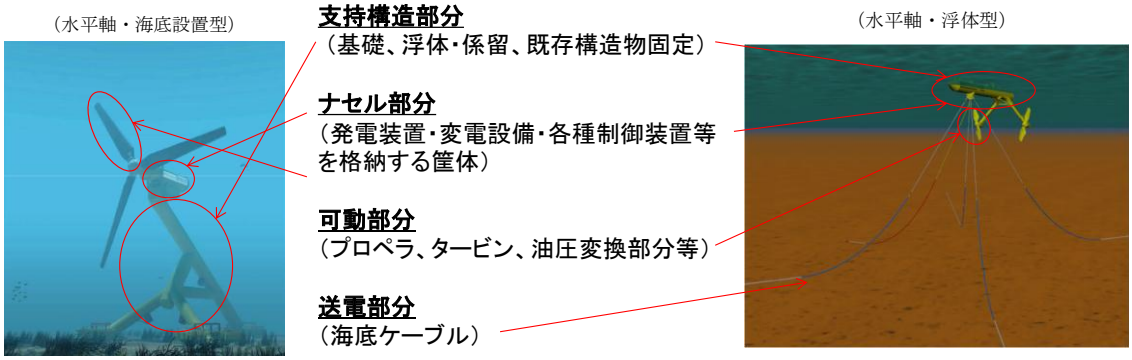


図 2-29　対象とする構成要素のイメージ

出所）（写真）Hammerfest Strom 社ホームページ[2-8]、Scotrenewables Tidal Power 社ホームページ[2-9]

2.2.2　メーカー・事業者へのヒアリング調査結果

ハザードおよび安全対策の検討を行うにあたり、表 2-11 に示すメーカー・事業者にヒアリング調査を実施した。

表 2-11　ヒアリング対象

ヒアリング対象	発電方式
潮流発電装置開発事業者（1 社）	水平軸型・着床型潮流発電
波力発電装置開発事業者（2 社）	振動水柱型・沿岸設置型波力発電、 可動物体型・浮体型波力発電
海底ケーブルメーカー（1 社）	―

ヒアリング調査にあたっては、下記の項目について情報を収集した。

- 波力・潮流発電設備（系統連系を含む）の技術開発に係る取組みについて
- 実証試験及び商用運転において想定されるハザードについて
- 必要となる安全対策と課題について
- 発電方式別のリスク評価に係る留意事項
- 海外における海洋エネルギー発電設備のリスク評価や安全対策の動向について

ヒアリング調査結果を表 2-12 に示す。

表 2-12　想定されるハザードおよび必要となる安全対策に係るヒアリング調査結果

開発段階	構成要素	想定されるハザード	必要となる安全対策	技術方式別のリスク評価に係る留意事項
輸送時	全体	・　機器の落下	・　海洋土木事業者（マリコン）との事前のリスク検討、作業計画の検討	・　陸上輸送の場合、想定されるハザードが異なる。
設置・撤去時	全体	・　クレーン操作ミス等による機器の破損・人災	・　海洋土木事業者（マリコン）との事前のリスク検討、作業計画の検討 ・　設置作業の機械化	
	支持構造部分	・　アンカーと作業船との衝突	・　海洋土木事業者（マリコン）との事前のリスク検討、作業計画の検討	
		・　係留索の切断等		
	送電部分	・　ケーブル敷設時の作業ミス	・　実績のある設置事業者の選択	
運用時	全体	・　船舶・漁船との衝突	・　航路標識・ブイの設置 ・　漁船操業の制限海域の設置 ・	・　水中に設置する装置の場合、発電機上部と海水面との距離を十分に確保ことが重要
		・　高波、台風、雷、地震・津波等による機器の破損	・　非常時の自動運転停止 ・　漂流対策（自沈させる等）	・　装置が水中にある場合、台風の影響（風と波の両方）は数%程度と非常に小さくなる
		・　遊漁者・ダイバー・観光客の接近による人災	・　防護柵、立ち入り禁止の看板設置	
	支持構造部分	・　磨耗による係留索の切断	・　バイパスチェーン設置等の多重化 ・　係留索の磨耗に関するモニタリングの実施	
		・　高波、台風、地震・津波等による装置の転倒	・　基礎の安全設計	・　既存構造物（防波堤等）に設置する場合は、強度検査が必要
	ナセル部分	・　油の流出	・　油を使わない装置設計 ・　船と同水準の水密性の確保	・　高圧の発電機を用いて陸上もしくは洋上の変電設備で変電する場合、別途ハザード・安全対策の検討が必要
		・　ナセル内浸水による各種装置の故障	・　船と同水準の水密性の確保	
		・　落雷による機器の破損・火災	・　避雷針の設置	・　装置が水中にある場合、落雷による被害は想定されない

開発段階	構成要素	想定されるハザード	必要となる安全対策	技術方式別のリスク評価に係る留意事項
	可動部分	・ 過回転によるタービン・プロペラの破損・飛散 ・ 停電によるタービンの無負荷状態、回転数の異常上昇	・ 安全装置、電磁ブレーキ、圧抜き弁等の設置 ・	
	送電部分	・ 劣化・船舶との衝突等による海底ケーブルの破損・切断	・ 実証済・設置実績のある業者の製品を使用 ・ 航路標識の設置 ・ 航行制限	
メンテナンス時	ナセル部分	・ 人による水中作業時の作業ミス	・ メンテナンス作業の機械化	・ 陸上の発電設備の場合は、水中での作業が発生しないため、想定されるハザードが異なる。 ・ 水中・海面の発電装置であっても、装置を港湾まで曳航して、陸上でメンテナンスを実施する場合には、想定されるハザードが異なる。
		・ 塩害による腐食・漏電、感電	・ メンテナンス作業時の運転停止、安全装置の稼動	

2.2.3　想定されるリスクと安全対策の整理

文献・ウェブ調査で収集・整理した基礎情報（2.1）、メーカー・事業者へのヒアリング調査結果（2.2.2）、および「新発電技術を用いた発電設備に係る安全性検討委員会」における検討結果を踏まえ、想定されるリスクと安全対策を整理した結果を表 2-13 に示す。

表 2-13　潮流・海流発電、波力発電に係るハザード・安全対策分析表

フェーズ	ハザード（危険状況）						安全対策			
	ソース（発生源）		対象構成要素	可能性のある事象	可能性のある危害	危害の対象	ソース（発生源）を取り除く、危害を小さくする	危険状態の発生頻度を下げる	危険事象の発生確率を下げる	危険事象の回避可能性を高める
海上輸送時	外的要因	荒天（強風、高波、台風など）	全ての構成要素	輸送時の動揺・振動、過大な外力・荷重による、構成要素の破損・落下、破損物の飛散・漂流、油の流出	作業員の死傷	A	・適切な積載方法と固定方法の選択	・静穏な時期の選択 ・輸送計画・輸送可否の判断基準（海象条件等）の事前作成		
					漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収		・防護ネットの設置 ・事前の作業計画周知	・警戒船の配備
					構成要素の破損	B	・適切な積載方法と固定方法の選択	・静穏な時期の選択 ・輸送計画・輸送可否の判断基準（海象条件等）の事前作成		
					作業船の破損	B	・適切な積載方法と固定方法の選択	・静穏な時期の選択 ・輸送計画・輸送可否の判断基準（海象条件等）の事前作成		
					漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収（GPS設置、回収体制の整備等）		・防護ネットの設置 ・事前の作業計画周知	・警戒船の配備
					海洋汚染	C	・極力油を使用しない装置設計 ・生物分解油の利用		・油拡散防止フェンスの設置 ・	
設置・撤去・フルメンテナンス時	内的要因	施工機械	－	海中騒音、海水攪拌、懸濁物質の拡散、海底地形の改変	漁場環境への影響、漁獲量減少・藻場減少	C		・漁場・漁期の回避 ・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成	・汚濁防止用フェンス・膜の設置	
	外的要因	荒天（強風、高波、台風など）	全ての構成要素	重機による構成要素の移動及び組立時の動揺・振動・過大な外力による構成要素の破損・落下・転倒、破損物の飛散・漂流、油の流出	作業員の死傷	A		・静穏な時期の選択 ・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成		
					漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収		・防護ネット設置 ・事前の作業計画周知	・警戒船の配備 ・監視カメラ設置
					構成要素の破損	B				
					作業船の破損	B		・静穏な時期の選択 ・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成		
					漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収		・防護ネット設置 ・事前の作業計画周知	・警戒船の配備
					海洋汚染	C	・極力油を使用しない装置設計 ・生物分解油の利用		・油拡散防止フェンスの設置	・
		近隣航行船・漂着物	全ての構成要素	近隣航行船・漂流物の衝突による装置の破損、破損物の飛散・漂流、油の流出	作業員の死傷	A		・静穏な時期の選択		・警戒船の配備 ・監視カメラ設置
					漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収		・防護ネット設置 ・事前の作業計画周知	・警戒船の配備 ・監視カメラ設置
					構成要素の破損	B			・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成	
					作業船の破損	B			・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成	
					漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造	B	・漂流物の早期回収		・防護ネット設置 ・事前の作業計画周知	・警戒船の配備 ・監視カメラ設置

フェーズ	ハザード（危険状況）						安全対策			
	ソース（発生源）		対象構成要素	可能性のある事象	可能性のある危害	危害の対象	ソース（発生源）を取り除く、危害を小さくする	危険状態の発生頻度を下げる	危険事象の発生確率を下げる	危険事象の回避可能性を高める
					物の破損					
					海洋汚染	C	・極力油を使用しない装置設計 ・生物分解油の利用		・油拡散防止フェンスの設置	
	人的要因	船上作業時の人為的ミス	全ての構成要素	重機による構成要素の移動及び組立時の動揺・振動・過大な外力による構成要素の破損・落下・転倒、破損物の飛散・漂流、油の流出	作業員の死傷	A		・静穏な時期の選択 ・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成・		・実績のある事業者の選択
					漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収		・防護ネット設置 ・事前の作業計画周知	・警戒船の配備 ・監視カメラ設置
					構成要素の破損	B		・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成 ・		・実績のある事業者の選択
					作業船の破損	B				・実績のある事業者の選択
					漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成 ・	・防護ネット設置 ・事前の作業計画周知	・警戒船の配備
					海洋汚染	C	・極力油を使用しない装置設計 ・生物分解油の利用		・油拡散防止フェンスの設置	・
		潜水作業の人為的ミス	全ての構成要素	発電装置の転倒・沈没、破損物の飛散・漂流、油の流出	作業員の死傷	A	・撤去しない	・作業の機械化（ROV 等） ・静穏な時期の選択 ・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成		・実績のある事業者の選択 ・潜水作業に係る資格要求の策定
					漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収		・防護ネット設置 ・事前の作業計画周知	・警戒船の配備 ・監視カメラ設置
					構成要素の破損	B		・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成・		・実績のある事業者の選択 ・潜水作業に係る資格要求の策定
					作業船の破損	B		・施工計画・作業実施可否の判断基準（海象条件等）の事前作成・		・実績のある事業者の選択 ・潜水作業に係る資格要求の策定
					漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収		・防護ネット設置 ・事前の作業計画周知	・警戒船の配備
					海洋汚染	C	・極力油を使用しない装置設計 ・生物分解油の利用		・油拡散防止フェンスの設置	
運用時	内的要因	ナセル内機器	ナセル	水圧によるナセルの破損・浸水による内部装置の破損、漂流	構成要素の破損	C			・余裕のある構造強度・疲労強度の確保による信頼性向上 ・船舶と同程度の水密性確保 ・遠隔監視システム（異常の事前検知）の具備 ・日常メンテナンス時の確認徹底・適時の部品交換	
					漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
					漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
				塩害・腐食による発電装置ユニットの	構成要素の破損	C			・遠隔監視システム（異常の事前検知）の具備	

フェーズ	ハザード（危険状況）					安全対策			
	ソース（発生源）	対象構成要素	可能性のある事象	可能性のある危害	危害の対象	ソース（発生源）を取り除く、危害を小さくする	危険状態の発生頻度を下げる	危険事象の発生確率を下げる	危険事象の回避可能性を高める
			故障					・日常メンテナンス時の確認徹底・適時の部品交換 ・防食性能の向上、塩害対策の実施	
			油圧装置の破損による油の流出	海洋汚染	C	・極力油を使用しない装置設計			
	ブレード・主軸・発電機	ナセル	発電機の回転部と支持物の共振による装置の破損、漂流	構成要素の破損	C			・余裕のある構造強度・疲労強度の確保による信頼性向上 ・遠隔監視システム（異常の事前検知）の具備 ・日常メンテナンス時の確認徹底・適時の部品交換	・発電装置の回転部の自動停止装置の具備
				漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
				漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
			負荷遮断時の最大回転速度で生じる遠心力による機器の破損、漂流	構成要素の破損	C			・余裕のある構造強度・疲労強度の確保による信頼性向上 ・遠隔監視システム（異常の事前検知）の具備 ・日常メンテナンス時の確認徹底・適時の部品交換 ・非常電源の具備	・発電装置の回転部の自動停止装置の具備
				漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
				漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
			冷却装置の故障時の発熱による火災、構成要素の破損、漂流	構成要素の破損	C	・消防設備の具備		・余裕のある構造強度・疲労強度の確保による信頼性向上 ・遠隔監視システム（異常の事前検知）の具備 ・日常メンテナンス時の確認徹底・適時の部品交換	・発電装置の回転部の自動停止装置の具備
				漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
				漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
			海中騒音、海水攪拌、懸濁物質の拡散	漁場環境への影響、漁獲量減少・藻場減少	C			・余裕のある構造強度・疲労強度の確保による信頼性向上 ・遠隔監視システム（異常の事前検知）の具備 ・日常メンテナンス時の確認徹底・適時の部品交換 ・キャビテーションの防止	・発電装置の回転部の自動停止装置の具備
	基礎	支持構造	フランジ部分の折れ、構成要素の破損、漂流	構成要素の破損	C			・余裕のある構造強度・疲労強度の確保による信頼性向上 ・遠隔監視システム（異常の事前検知）の具備 ・日常メンテナンス時の確認徹底・	

フェーズ	ハザード（危険状況）					安全対策			
	ソース（発生源）	対象構成要素	可能性のある事象	可能性のある危害	危害の対象	ソース（発生源）を取り除く、危害を小さくする	危険状態の発生頻度を下げる	危険事象の発生確率を下げる	危険事象の回避可能性を高める
								適時の部品交換	
				漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
				漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
	係留索		波浪時の摩耗・ねじれによる係留索の破断及び漂流	係留索の破損・破断	C			・余裕のある構造強度・疲労強度の確保による信頼性向上 ・遠隔監視システム（異常の事前検知）の具備 ・日常メンテナンス時の確認徹底・適時の部品交換 ・海象条件と構造特性に応じた適切な係留ラインの選択	
				漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
				漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
	アンカー		耐荷重不足による引きずられ現象による海底ケーブルの破損・破断	係留索の破損・破断	C			・アンカーポイントの海底の地形的条件に応じた適切なタイプのアンカーを選択	
				漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
				漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
	海底ケーブル（ダイナミックケーブル）	送電	波浪時の摩耗・ねじれ・破断によるケーブル破断及び漂流	海底ケーブルの破損	C			・遠隔監視システム（異常の事前検知）の具備 ・日常メンテナンス時の確認徹底・適時の部品交換	
				漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
				漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
	外的要因	荒天（強風、高波、台風など）	全ての構成要素	構成要素の破損、破損物の飛散・漂流	構成要素の破損	C		・余裕のある構造強度・疲労強度の確保による信頼性向上 ・遠隔監視システム（異常の事前検知）の具備 ・日常メンテナンス時の確認徹底・適時の部品交換	・発電装置の回転部の自動停止装置の具備
					漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
					漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
					海洋汚染	C	・極力油を使用しない装置設計 ・生物分解油の利用			

フェーズ	ハザード（危険状況）						安全対策			
	ソース（発生源）		対象構成要素	可能性のある事象	可能性のある危害	危害の対象	ソース（発生源）を取り除く、危害を小さくする	危険状態の発生頻度を下げる	危険事象の発生確率を下げる	危険事象の回避可能性を高める
			支持構造	ケーソン・防波堤の転倒	構成要素の破損	C			・ケーソン・防波堤の構造強度・疲労強度の事前確認	
		落雷	全ての構成要素	発電装置の火災、破損、破損物の飛散・漂流	構成要素の破損	C	・消防設備の具備		・避雷針の設置 ・ブレードの適切な場所へのレセプタ設置	
					漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
					漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
		船舶・漂流物など	全ての構成要素	装置全体、一部の破損・転倒、設置・撤去物と船の衝突、破損物の飛散、油流出	構成要素の破損	C		・航路標識設置、航行禁止区域設定 ・適切な灯火		
					漂流物による遊漁者、レジャー客負傷	A	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		・監視カメラ設置
					漂流物による近隣航行船の破損、沿岸構造物の破損	B	・漂流物の早期回収	・漂流防止対策 ・実証試験サイトの活用		
					海洋汚染	C	・極力油を使用しない装置設計 ・生物分解油の利用			
	人的要因	遊漁、レジャー客などの接近		不慮の事故	遊漁、レジャー客の負傷、装置故障	A,B	（遠方設置）	・防護柵、防護ネット設置	・周知徹底	・監視カメラ設置 ・発電装置の緊急停止装置の具備
日常メンテナンス時	人的要因	洋上作業	ー	装置アクセス時のミス	作業員の死傷	A		・遠隔監視システム等の活用によるメンテナンス頻度削減 ・静穏な時期の選択 ・作業計画の事前作成 ・		・専用アクセス船の使用 ・実績のある事業者の選択 ・発電装置の緊急停止装置の具備
		潜水作業	（作業）	潜水士の危険な位置への移動、巻き込み　等	作業員の死傷	A	・作業の機械化（ROV 等）	・遠隔監視システム等の活用によるメンテナンス頻度削減		・実績のある事業者の選択 ・潜水作業に係る資格要求の策定 ・発電装置の緊急停止装置の具備

- 内的要因において考慮する対象：支持構造部分（既存構造物設置・係留・浮体設備・海底固定）／可動部分（動力変換部分）／ナセル部分／送電設備　等の設備内部に由来するハザード　他
- 外的要因において考慮する対象：　地理的環境（自然災害など含む）／生態学的環境）、ミクロ環境（システムの設置環境／作業環境）、船舶などの外的要因　他
- 人的要因において考慮する対象：ヒューマンエラー　他
- 危害の対象：　A：人命・健康への影響・被害、B：資産への影響、C：環境影響
- 発電設備：　　波力発電（着底）、波力（浮体）、波力（岸壁）、潮流（着底）、潮流（中層）、潮流（浮体）　※潮流（中層）≒海流
- フェーズ：　　「危険事象が発生する可能性のある段階」を想定（対策はフェーズに因らず、「設計時での対策」「別のフェーズでの対策」も含む）

安全対策	説明
ソース（発生源）を取り除く、危害を小さくする	「ソース（発生源）」そのものをなくす、あるいは「ソース（発生源）」が持つ危険性を小さくするための対策
危険状態の発生頻度を下げる	「危害の対象」（人・資産・環境）が「ソース（発生源）」にさらされる頻度を下げるための対策
危険事象の発生確率を下げる	「可能性のある事象」が発生する確率を下げるための対策（保護機能の信頼性向上等）
危険事象の回避可能性を高める	「可能性のある事象」が発生しても「可能性のある危害」を回避できる可能性を高めるための対策

2.2.4　リスク評価および安全基準の検討に係る留意事項

次年度以降の課題としては、具体的な装置を想定したリスク評価およびそれに基づく安全基準の検討が挙げられる。ここでは、リスク評価および安全基準の検討に係る留意事項を整理する。

(1) 技術方式別のリスク評価および安全基準検討の留意点

技術方式別のリスク評価および安全基準検討時の留意点を表 2-14 に示す。表 2-10 にて整理したとおり、潮流発電および波力発電は、発電方式、設置方式、ナセル位置の違いにより分類され、それぞれに想定されるハザードや、危害の程度、発生確率等が異なると考えられる。

例えば、浮体式または海面にナセルがある発電装置は、他の方式と比較して船舶衝突が起こる可能性が高く、結果として船舶衝突に係るリスクが大きくなると考えられる。また、ナセル位置が水中にある発電装置は、他の方式に対して、荒天や落雷の影響が小さい一方、潜水作業時のハザードの発生確率が高く、結果として潜水作業に係るリスクが大きくなると想定される。リスク評価にあたっては、ここに例示される、各技術方式別のハザードの差異を考慮することが重要と考えられる。

表 2-14　技術方式別のリスク評価および安全基準検討の留意点

技術方式 ＼ 発生源			内的要因	外部要因			人的要因		その他
			油使用	荒天（強風、高波、台風など）、落雷	船舶衝突、漁具接触	漂流物衝突・接触	作業ミス	遊漁、レジャー客などの接近	
発電方式	波力	水柱振動型	－	－	－	－	－	－	停電時の負荷遮断状態による回転速度の過増大
		可動物体型	－	－	－	－	－	－	－
		越波型	－	－	－	詰まりによる故障リスク有り	－	－	－
	潮流・海流	水平軸型、垂直軸型	潤滑油の染み出しによる海洋汚染リスク有り	－	－	可動部へのからまりによる故障リスク有り	－	－	海棲生物の衝突
設置方式		浮体型	－	荒天時の係留索・海底ケーブル破断、漂流リスク大 係留索破損時の浮体漂流リスク有り	船舶衝突リスク大 係留索への漁具接触リスク大	－	－	－	ダイナミックケーブルとスタティックケーブルの接続方策
		着底型（モノパイル式）	－	漂流リスク小	－	－	－	－	－
		着底型（重力式）	－	漂流リスク小、移動/転倒あり	－	－	－	－	
		沿岸設置型（既存構造物（防波堤、橋脚等）への設置）	－	－	船舶衝突リスク小 漁具接触リスク小	－	洋上・潜水作業ミスに係るリスク小	－	ケーソン・防波堤の強度の事前確認
ナセル位置		水中	耐水圧／水密性／多重化対策重要	強風・高波・台風の影響小 落雷リスク小	－	衝突リスク小	メンテナンス時の潜水士事故	－	海中騒音対策 メンテナンス方策の検討
		海面	水密性／多重化対策重要	強風・高波・台風の影響大 落雷リスク大	船舶衝突リスク大	衝突リスク大	－	－	積雪の加重対応
		陸上	耐波／耐水性対策重要	強風・高波・台風の影響大 落雷リスク大	船舶衝突リスク小 漁具接触リスク小	岸壁や防波堤に設置する場合リスク有り	洋上・潜水作業ミスに係るリスク小	岸壁や防波堤に設置する場合遊漁者の接近リスク大	積雪の加重対応

(2) 実証試験段階と商用運転段階のリスク評価および安全基準検討の留意点

リスク評価および安全基準を検討するにあたっては、実証試験段階と商用運転段階におけるリスク評価の考え方の整理が必要と考えられる。

表 2-15 に実証試験段階と商用運転段階におけるリスク評価および安全基準検討における観点の一例を示す。例えば、商用運転段階では電力の安定供給の確保が電気事業法上の認可要件として重視されるが、実証試験では必ずしも系統連系をするとは限らず、また系統連系をした場合においても、機器のサイズや基数が小さいことから、周辺の系統運用に与える影響は小さいと想定される。また、商用運転段階においては、実証試験による運転実績があるもの、または国際・国内規格を取得した機器・設備を使用することが前提となると考えられるが、実証試験段階においては、出来るだけ実績のある機器・設備の使用が求められるものの、新発電技術の技術開発という性質上、一部実績の無い機器・設備の使用は許容するのが妥当と考えられる。また、商用運転段階においては、投資回収を前提としていることから、修復不可能な装置の破損は大きな経済的損失であり、その影響は重度と評価されると考えられるが、実証試験段階においては、基本的に投資回収を前提としていないため、修復不可能な装置の破損であっても必ずしも重度とは評価されないものと考えられる。

このように、実証試験段階においては認可要件を緩和することが妥当と考えられる観点がある一方で、実証試験段階において、より厳しく安全対策を実施する必要があると考えられる項目も存在する。例えば、実証試験段階においては、これまでに経験の無い機器の輸送・設置・運転を行うことから、商用運転段階以上に、輸送・設置時の安全対策を実施することが重要と考えられる。また、運用時に想定される事故についても不明点が多く、重大な事故が発生しないよう、運転時のモニタリングをより厳密に行う必要がある。

したがって、一概に実証試験段階において認可要件を緩和するのではなく、実証試験段階の特性を踏まえ、必要となる安全対策を十分に実施することを前提とした上で、技術開発の推進という観点から、適切な安全基準の設定を行うことが重要と考えられる。

また、実証段階のリスク評価および安全基準を検討するにあたっては、技術開発段階ごとに考え方を整理することも重要と考えられる。

図 2-30 に、欧州において海洋エネルギー発電設備で推奨されているステージゲートアプローチの概念図を示す。ステージゲートアプローチとは、海洋エネルギーデバイスを開発するにあたって、コンセプト段階から商用化までの 5 段階（Stage 1 から Stage 5）に分け、次のステージに進むためのクライテリア（条件）を設定する技術開発方式である。ステージゲートの段階は、アメリカ航空宇宙局（NASA）で整理されている技術成熟度と呼ばれる尺度 TRL（Technology Readiness Level）に対応して設定されている[2-19]。各ステージにおいて求められる技術成熟度は異なっており、ステージを進むごとに、クライテリア（条件）は厳しくなる。

ステージゲートアプローチでは、ステージ 3 以降に実海域における実証試験が設定されており、ステージ 3 では小型プロトタイプによる実海域試験、ステージ 4 では原寸プロトタイプによる実海域試験、ステージ 5 では複数機配列による実海域試験が想定されている。

例えば、ステージ 3 において求められる技術成熟度（TRL5～6）は、機器を構成するサブ

システムの検証およびパイロットスケールの技術実証であり、完成し品質を担保した実システムの実証が求められるステージ5とは大きく異なっている。また、小型プロトタイプ機であることから、例えば機器の破損時に周辺環境に与える影響は、原寸プロトタイプ機よりも小さい（ハザードの影響が小さい）ことが想定される。また、系統連系をする場合においても、発電出力が小さいことから、周辺の系統運用に与える影響も軽微であることが想定される。

このように、いずれのステージにおいても安全の確保は重要であり、定められた安全基準を満たすことは必須である一方、技術開発を推進する観点からは、各技術開発段階で求められる技術成熟度を踏まえた適正なリスク評価とそれに基づく安全基準の設定を行うことが重要と考えられる。

表 2-15　実証試験段階と商用運転段階におけるリスク評価・安全基準検討における観点例

項目	商用運転段階	実証試験段階
電力の安定供給の確保	○ 電力安定供給が前提となる。	△～× 実証試験段階においては（特に小規模試験機の場合）、電力の安定供給は求められない。
安全対策		
導入実績のある、国際・国内規格を取得した設備・部品の使用	○ 実証試験を経て、実績のある機器・設備を利用することが前提。地域特性（地形・海象・気象条件）に起因する不確実性については、厳しい条件下での実証結果を踏まえ、シミュレーション等で検証が必要。	△ 出来るだけ実績のある機器・設備を使用するが、新発電技術の性質上、一部、実績の無い設備等の利用を許容するのが妥当。一部、類似設備等の基準の援用を可能とする、援用を評価する仕組みも課題
輸送・設置時の安全対策	○	◎ 事業者にとって経験の無い作業となる場合も多く、危険を伴う可能性がある（事前リスク評価が重要）。
運用時のモニタリング	○	◎ 類似基準を援用等を認める代わりに、係留の確認等、運用時のモニタリングを充実させる。
危害の程度		
全壊等の防止による資産の保護、経済的損失の回避	○ 装置に対する投資回収が前提であり、修復不可能な装置の破損は重度と評価。	△ 基本的に投資回収を前提としていないため、修復不可能な装置の破損であっても必ずしも重度とは評価されない。 （ただし、撤去コストは事業者負担が前提。また、第三者への修復不可能な破損は重度と評価）。

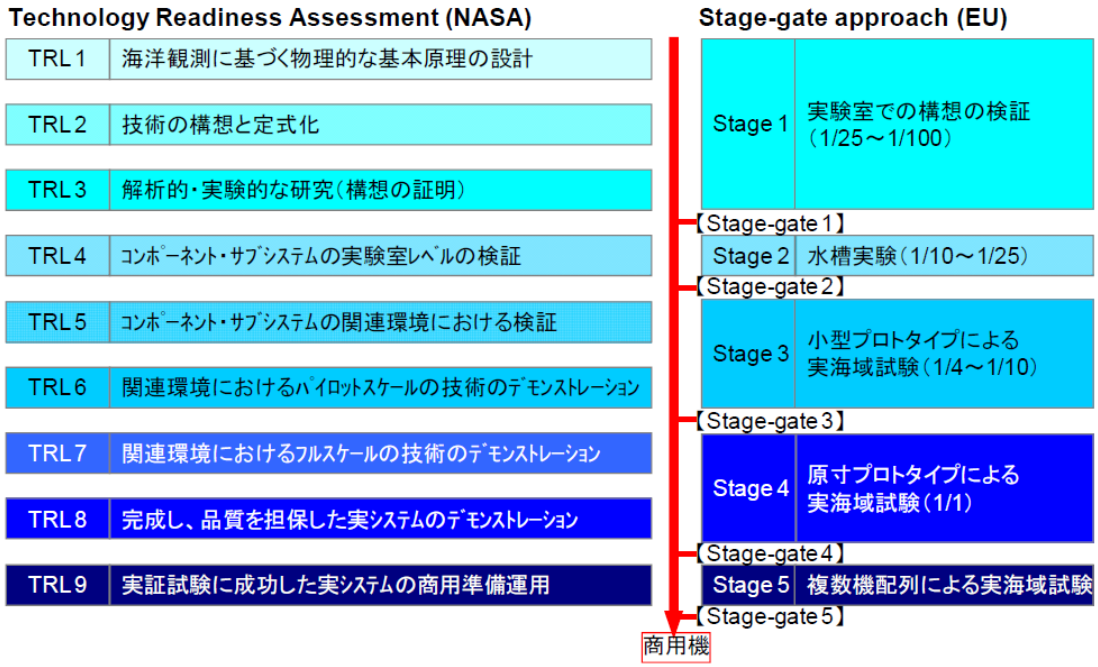


図 2-30　海洋エネルギー発電設備で推奨されるステージゲートアプローチ

出所）「海洋エネルギー発電技術の性能試験方法等の検討」（2013, NEDO）[2-19]

3. 熱電発電

3.1 国内外の技術動向

3.1.1 熱電発電の原理と特徴

熱電発電の基本となる現象が、電気伝導体で発生する「ゼーベック効果」と呼ばれる現象である。金属や半導体等の電気伝導体の両端に電極を取り付け、両端に温度差を発生する状況とすると、n 型の電気伝導体の場合、電気伝導体の中の自由に動く電子（伝導電子）は、高温側から低温側に熱拡散する。電子は負の電荷をもっているので、このときにできた伝導電子の濃度勾配により、低温側はマイナスに高温側はプラスとなり、両端の電極間に電圧が発生する。p 型伝導体の場合は、電圧の向きが逆になる。この電圧が発生する現象は、発見者の名前をとってゼーベック効果と呼ばれている。[3-1]

ゼーベック効果により発生する起電力 ΔV は温度差 ΔT に正比例する。その比例係数

$S = \Delta V / \Delta T$

をゼーベック係数と呼ぶ。ゼーベック係数 S が大きければ大きいほど、大きな電圧が発生することになる。

ゼーベック効果は全ての電気伝導体で発生する現象であるが、ほとんどの材料ではその大きさが無視できるほど小さい。いくつかの特別な物質が大きなゼーベック係数を有しており、これらの物質を「熱電材料」と呼ばれている[3-1]。

熱電発電に利用する材料としては、ゼーベック係数が大きいだけでなく、内部抵抗が小さく大きな電流が得られること、継続的に温度差を維持できる材料であることが必要とされる。これらを評価するための指標として、熱電性能指数 ZT が定義されている。[3-1]

$ZT = S^2 \sigma T / \kappa$

ここで、S ： ゼーベック係数、σ ： 電気伝導率、κ ： 熱伝導率 T:絶対温度 である。

この式から、熱電性能が高い材料は、大きなゼーベック係数 S、高い電気伝導率 σ 、低い熱伝導率 κ をもつ材料であることがわかる。

各種の熱電材料の ZT の温度依存性を図 3-1 に示す[3-2]。ZT はある温度で極大値を示す傾向をもっており、熱電材料によって特異な温度範囲があることがわかる。現在、最も広く使用されている熱電材料は Bi_2Te_3 であるが、ゼーベック係数が大きいことと、実用化しやすい温度範囲で性能を発揮できるためである。

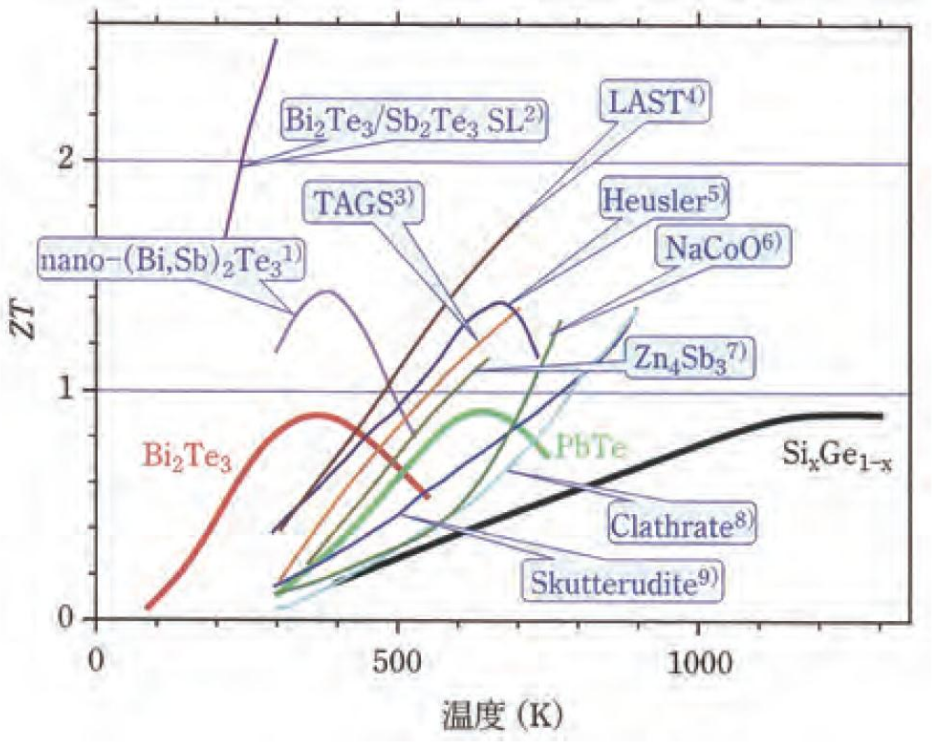


図 3-1 熱電材料の無次元性能指数 ZT の温度依存性
（参考資料[3-2]より引用）

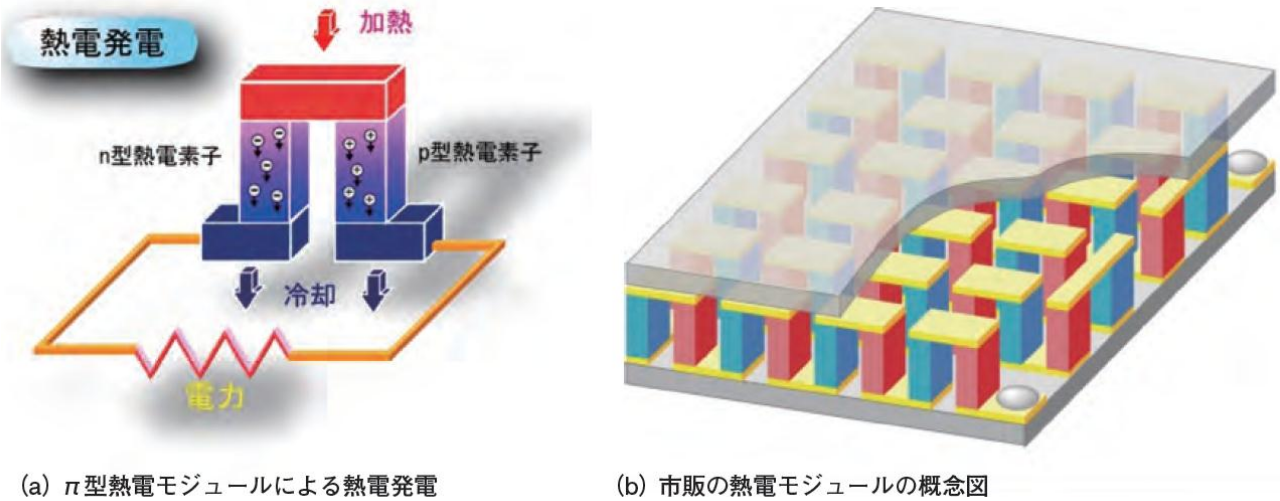


図 3-2 熱電モジュール
（参考資料[3-1]より引用）

一つの熱電材料で得られる電圧は小さいため、熱電モジュールは複数の熱電材料を直列に接続して電圧を確保する構成になっている。n 型と p 型を組み合わせたπ型熱電モジュールが一般的であり、市販の熱電モジュールでは、この構造が何対も接続されて電圧を確保できるようになっている[3-1]。

熱電発電は温度差が存在すれば発電できるため、駆動部が必要なく、構造が単純であるという特徴を持っている。またそのために、騒音や振動を発生することがなく、周囲に対して環境

の悪化を与えることが非常に少ない発電システムであるといえる。また、稼働が開始されると、稼働する部分もないために、部品交換や調整を行う必要がなく、メンテナンスフリーなシステムであると言われている。太陽光発電、風量発電等の再生可能エネルギーと比較すると、熱電発電システムは、天候に左右されずに、連続して安定した発電が可能なシステムであることも特徴の一つである。

工場等の排熱に熱電発電を適用することも検討されている。排熱温度と年間排熱量の関係を図 3-3 に示す。鉄鋼関係炉とごみ焼却場については、排熱温度が 300～600℃と高く、上記発電やヒートポンプの熱源利用など、排熱回収が進んでいる。一方、図 3-3 に示すように150℃以下の比較的低温度の排熱源の領域では、排熱を回収する技術が確立していないが、この領域におけるエネルギー総量は図に示されているとおり膨大である。そのため、低温での有効なエネルギー回収技術が望まれ、熱電発電システムの適用が期待される。

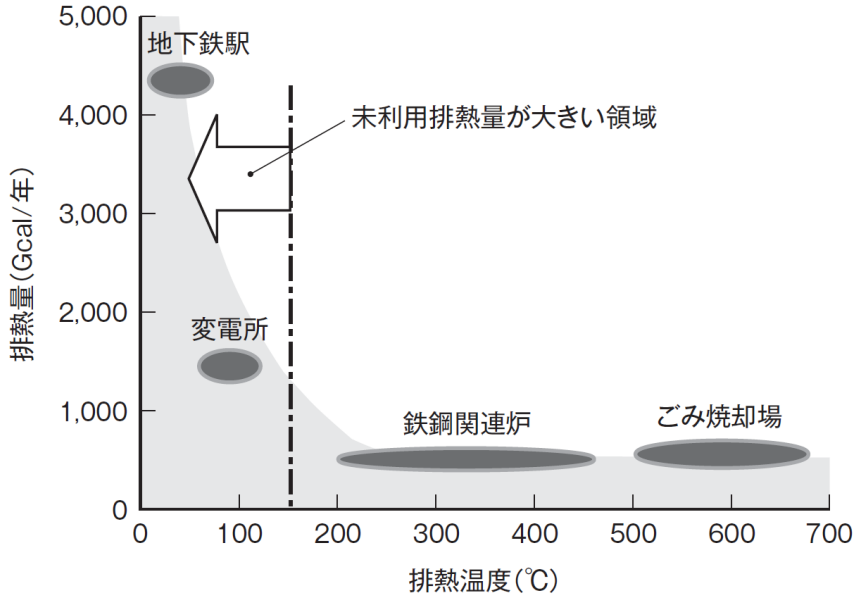


図 3-3 排熱温度と年間排熱量
（参考資料[3-3]より引用）

熱電発電システムの基本構成は、図 3-4 のように示される[3-4]。基本的には、熱電発電ユニットと計測・制御ユニットに分かれる。熱電発電ユニットは、熱電変換モジュールと、熱電変換モジュールに温度差を発生させるための高温熱源と低温熱源で構成される。熱源のための熱媒体が液体の場合は、高温熱媒体、低温熱媒体が流れるチャンバが熱電変換モジュールに温度差を発生させる。

計測・制御ユニットは、DC-DC 変換器、DC-AC 変換器、バッテリーから構成される。熱電変換モジュールが発電する電流は直流である。発生する発電量は、熱源の熱容量（熱媒体の温度、比熱、流量）と熱電発電面積（熱電変換モジュール数）により決定される。つまり、熱源が

決まると熱電発電面積により発電量は決定する。[3-4]

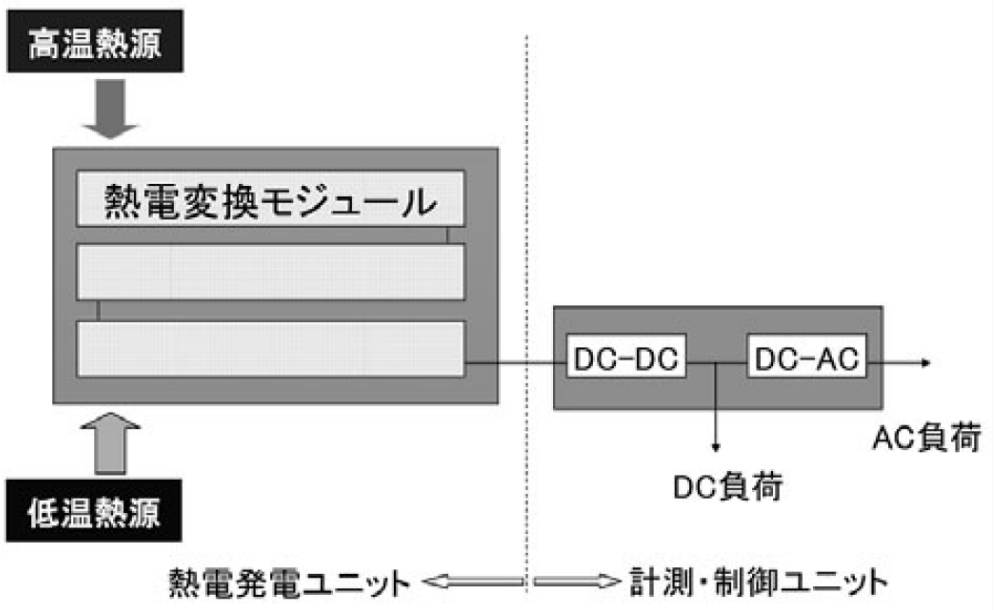


図 3-4 熱電発電システムの基本構成

3.1.2 熱電発電の適用例

(1) 工場排熱利用

(株)KELK は、熱電発電システムの工場排熱回収への適用可能性検討と同時に熱電発電システムに対する社会的認知の促進と信頼性および耐久試験の一環として、コマツ粟津工場浸炭設備に熱電発電システムを設置した。[3-5]

図 3-5 に設置された熱電発電システムの概略図を示す。火炎は浸炭ガス(RX ガス)中の H_2 と CO を除外するためにパイロットバーナーで転化して燃焼させることで発生する。これによって熱電発電機の集熱板を加熱する。集熱板の大きさは 400mm×280mm であり、集熱面積増加と集熱効率の向上の目的でフィン構造を設け、表面を黒色化処理している。

集熱板の反対側に熱電発電モジュールを 4 モジュールずつ 4 グループの 16 モジュールを配置している。使用された Bi-Te 熱電発電モジュールを図 3-5 に示す。1 つのモジュールの大きさは、50mm×50mm×4.2mm(リード線含まず)であり、質量は 47g である。出力は最大 24W(高温側電極 280℃、低温側電極 30℃のとき)とされている。

熱電発電モジュールは集熱板と水冷板の間にばね構造によって挟み込まれ、ほぼ一定の加圧力が保持されるようになっている。加圧力は 1MPa が目安とされた。冷却水量は 10～12 l/min でり、低温側電極側は 40℃以下に保たれていると推察されている。集熱板の温度は浸炭プロセスに依存して、120℃から 250℃の範囲で変化する。集熱効率は約 20%であり、20kW の火炎燃焼熱から約 4kW の熱量が得られている。

発電した電気は図 3-7 のシステム系統図に示すように、MPPT 充放電コントローラを介してバッテリに蓄電される。バッテリからの電力を汎用インバータで AC100V に変換し、工場内の LED 照明灯電力として供給されている。

冷却水量、冷却水温度、集熱板温度は常時監視されており、これらからの異常信号の発生によりアクチュエータが稼働し、熱電発電ユニットが火炎から退避する機構で安全性を確保している。

集熱板の温度が 250℃のときに、240W の出力が得られており、各モジュールが平均で 15W 出力していることになる。

2009 年 10 月から 2011 年 11 月まで、通算 10,000 時間以上の稼働実績を持っている。また、連続稼働 2,000 時間以上でも、出力低減は認められていない。

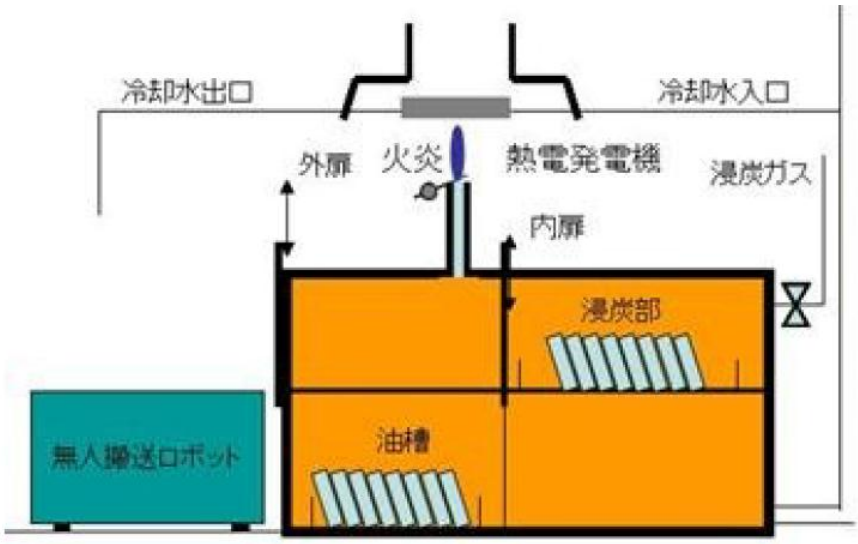


図 3-5 熱電発電システム概略図
（参考文献[3-5]より引用）

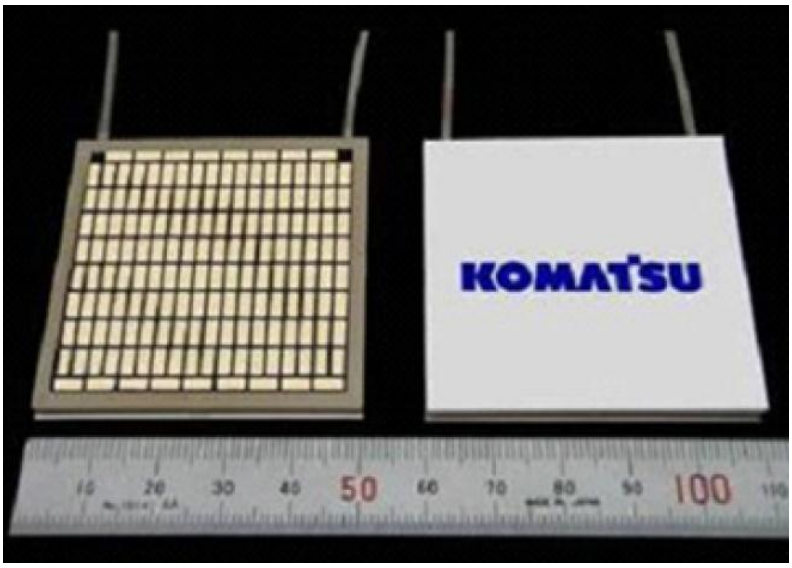


図 3-6 Bi-Te 熱電発電モジュール
（参考文献[3-5]より引用）

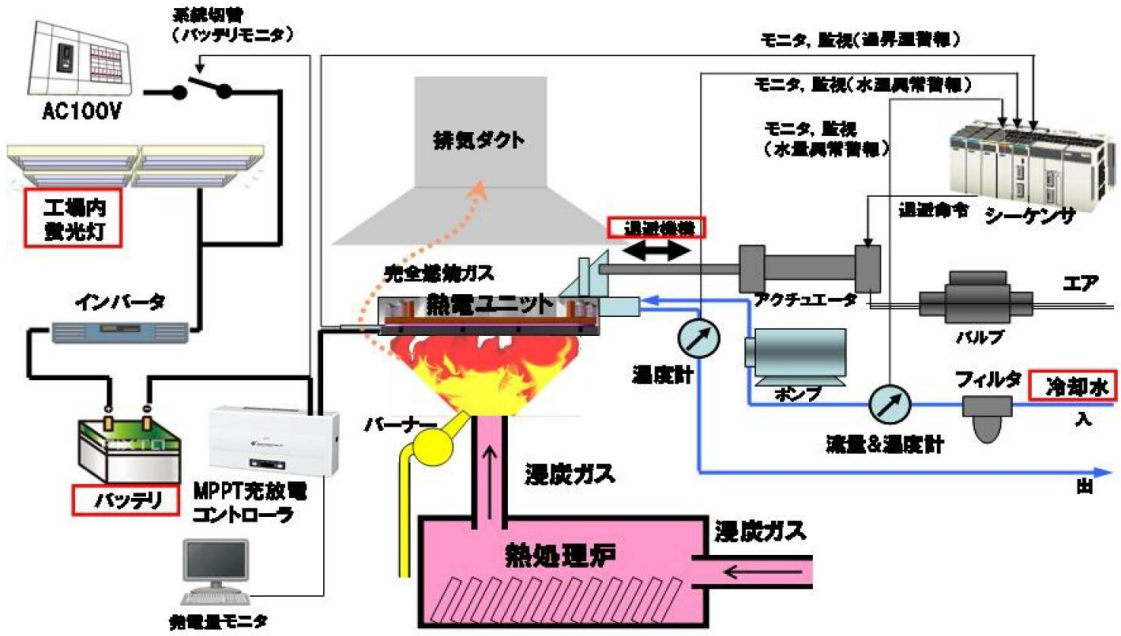


図 3-7 熱電発電システムのシステム系統
（参考文献[3-5]より引用）

(2) 温泉熱利用

（株）東芝は、熱電発電システムの実用化に向けた取り組みの一つとして、温泉熱発電システムを群馬県草津町と共同開発している。[3-4]

図 3-8 に温泉発電システムの外観を示す。この熱電発電システムでは、約 300 個の熱電変換モジュールが使用されている。熱電変換モジュールの総発電面積は 0.8m² である。図 3-9 に示すように、熱電発電システムで発電された電気は制御ユニット（充電器、インバーター、バ

ッテリ)を経由して、LED 照明、液晶テレビ等に利用されている。

2004 年 3 月に試作機を据え付けて、2005 年 2 月まで約 9,000 時間の発電試験が行われた。その試験結果に基づく検証機が 2005 年 12 月に完成し、2010 年 4 月時点で約 35,000 時間の総発電運転時間を達成している。熱電発電システムの発電性能の低下は見られず、特に問題は発生していない。

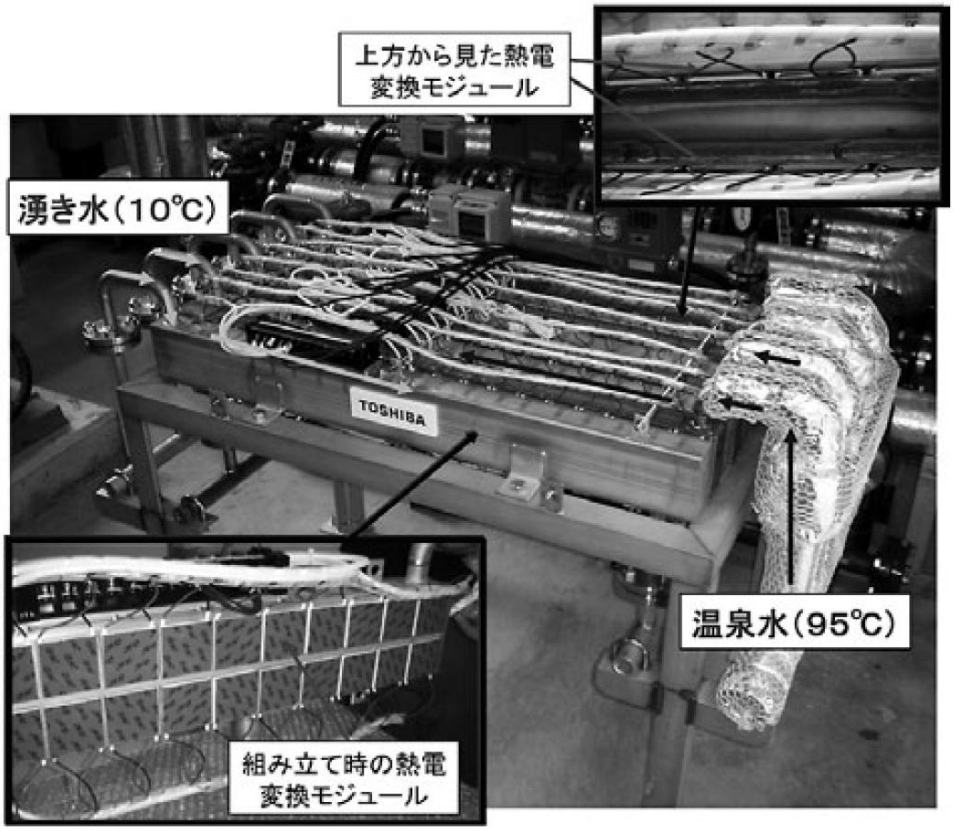


図 3-8 温泉と湧き水との温度差で発電する温泉発電システム
(参考文献[3-4]より引用)

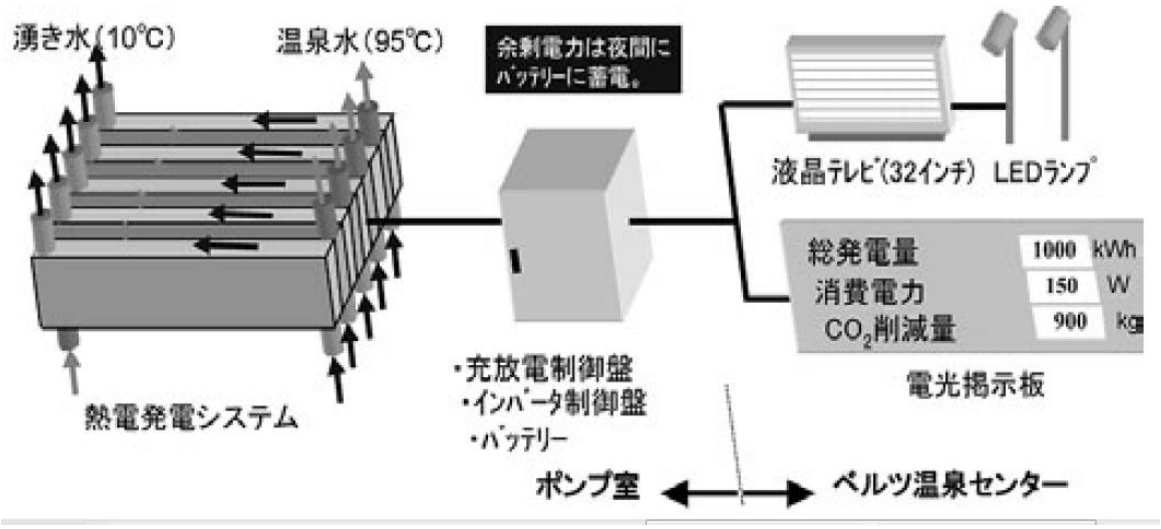


図 3-9 温泉発電システムの設置状況
（参考文献[3-4]より引用）

(3) 焼却炉の熱電発電

焼却炉の製造販売を手掛ける株式会社アクトリー（石川県白山市）は、工場などの低温排熱を利用して発電する「熱電発電システム」を開発した。2014 年 5 月の完成をめどに、本社工場内でシステムの生産ラインの建設に着手し、まずは焼却炉ユーザーへの販売を見込んでいる。将来的には車の排熱を利用する車載用小型発電システムの実用化も目指すとされている。[3-6]

(4) 製鉄所排熱による熱電発電

JFE スチールは 2013 年 7 月に、東日本製鉄所で実施している排熱を利用した熱電発電技術の実証試験について、 計画通りの発電出力が得られ製鉄所内で有効利用できること確認したことを公表している。[3-7]

当実証試験は、KELK、国立大学法人北海道大学（エネルギー・マテリアル融合領域研究センター）と共同で、（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の省エネルギー革新技術開発事業として 2012 年 1 月から実施している「製鉄プロセスにおける排熱を利用した熱電発電技術の研究開発」の一環で行われたものである。

2013 年 3 月に東日本製鉄所（京浜地区）の連続鋳造設備に設置した熱電発電システム（図 3-10 参照）を用いて、スラブ（圧延用半製品鋼塊）から放出されるふく射熱から 10kW 級の発電を行うもので、スラブの上方にパネル状の熱電発電システムを配置している。得られた電力はパワーコンディショナを介して直流から交流に変換後、既存の配電線に接続し、所内設備の電源として利用される。

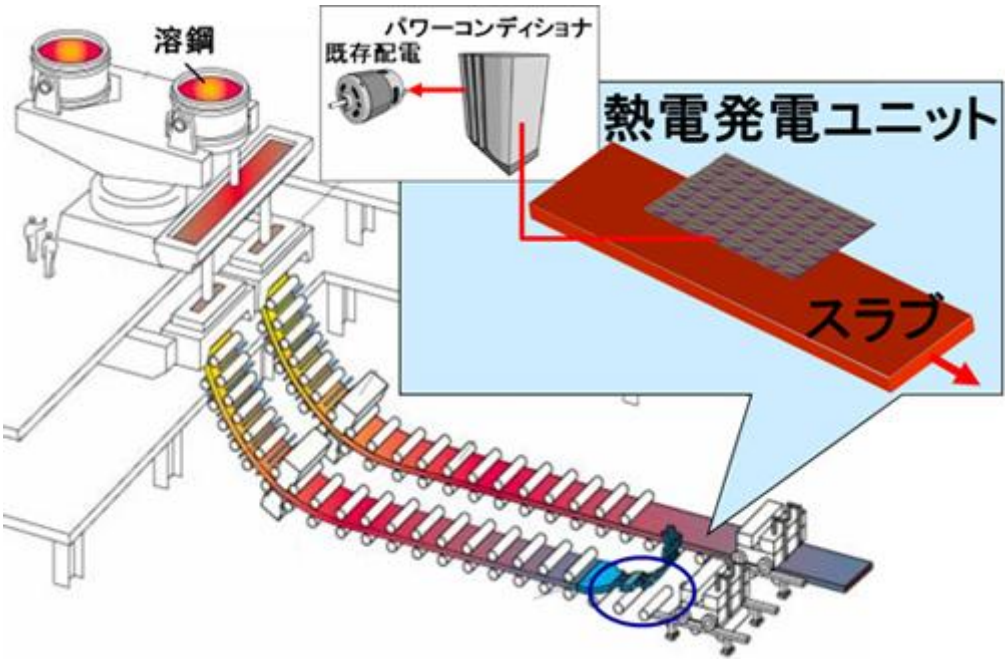


図 3-10 連続鋳造設備への熱電発電システム設置イメージ
（参考文献[3-7]より引用）

(5) パイプラインの監視装置への利用

カナダの Global Thermoelectric 社では、石油ガスのパイプラインの監視システム（SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition）の電源に使用するための熱電発電システムを開発している。 [3-8]

図 3-11 に熱電発電システムの構成図を示す。高温側はパイプラインから燃料を供給して熱を発生させ、低温側はクーリングファンで空冷する構造になっている。図 3-12 に製品の写真を示す。燃料を供給するだけで、保守も燃焼バーナーの点検のみで済む点が特徴であり、パイプラインのように人が行くことが難しいところに設置された設備の電源としては、最適であると考えられる。

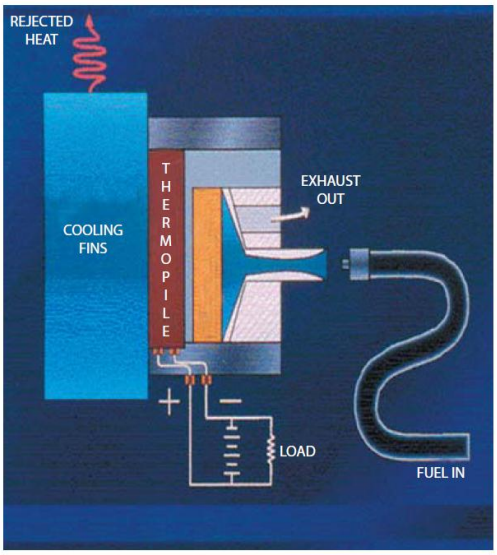


図 3-11 Global Thermoelectric 社の熱電発電システムの構成

図 3-12 Global Thermoelectric 社の熱電発電システム

3.1.3 熱電発電利用の今後の動向

熱電発電の利用として、将来的に期待されている領域としては、自動車の排ガスを利用した分野、エネルギーハーベストとしての発電分野、工場等の排熱を利用した分野が考えられる。

自動車の排ガスによる熱を利用して熱電発電を行う試みは、国際的にも注目を集めて研究が進んでいる。CO_2 の削減や高騰する燃料費に対する対策として、自動車やオートバイ等の燃費を向上させることが求められている。現状においては自動車の排熱利用による燃費向上の研究が進められている。欧州では 2015 年～2020 年に自動車の燃費効率に対して排ガスや二酸化炭素排出量の制限が厳しく設けられる規制があることから、自動車メーカは、熱電発電を利用した燃費効率向上により規制をクリアすることをめざし、欧州および米国でプロジェクトが進められている。

米国ではエネルギー省（DOE:US Department of Energy）によるエネルギー効率及び再生可能エネルギーの一環である FCVT（Freedom CAR & Vehicle Technologies）プログラム等にお

いて、車両の派出ガスの排熱エネルギーを対象とし、熱電発電技術に関する研究開発が推進されており、超格子材料やその応用技術に代表されるナノ構造材料技術領域までの研究開発等が展開されている[3-10]。

米国 DOE のプロジェクトは 2012 年 1 月から第 2 期に入り国際的に注目されており、4 年間の取り組みで燃費を 5%節約することを目指している。例えば、現状では自動車のライト等の電気系統は、エンジンの動力により動かす発電機により供給されているが、これをエンジン以外の手段により電力をまかなうことができれば、消費する燃料を減少させることができる。国内外の自動車メーカおよび熱電発電モジュールメーカ等では、自動車における熱電発電の利用に向けて、様々な開発が進められている。

太陽光や照明光、あるいはいろんな場所の振動や熱などの微小なエネルギーを採取（ハーベスト）し電力を得る技術として、エネルギーハーベスト（環境発電、エナジーハーベストと呼ぶこともある）の技術が注目されている。熱電発電は、このエネルギーハーベストの発電源としても着目されている。村田機械では、温度差 10℃で 100μW の出力が得られる熱電モジュールを開発している[3-9]。このモジュールでは、温度センサと無線モジュールを動作させることが可能であり、配線、電池レスで半永久的に駆動できるネットワーク上のセンサデバイスとして利用されることが期待される。

工場等の排熱の利用に関しては、3.1.2 の適用事例で述べたように、国内の工場において実用化を目指す検討が進められている。

排熱を利用した発電としては、排熱により蒸気を発生させ、その蒸気によりタービンを回転させて発電する方法が考えられる。発電効率としてはタービンによる発電の方が熱電発電より高いが、蒸気タービンの発電システムを導入する費用に比べると、熱電発電システムの導入費用は、低価格にすることができると言われている。また、熱電発電は、蒸気タービン利用の場合よりも、より低い温度領域でも発電が可能であるというメリットもある。

熱電発電は、メンテナンスの手間が少ない、さらには小型化することが可能であるため、様々な場所で熱を利用することができるメリットがあるといえる。

ただし、排熱利用の熱電発電システムは、その規模的に電気事業法の電気工作物に相当するため、設置にあたっては経済産業所の認可が必要とされる。その認可を得ることの敷居が高いために、国内での実証試験的な取り組みを躊躇するために開発の検討が進みにくい、という意見を今回の委員からいただいている。

熱電発電システムの実用化には、そのコストとパフォーマンスの確保が重要である。各種発電システムにおける単位出力あたりのシステム（プラント）コストを図 3-13 示す[3-10]。温度差 200℃の熱電発電システムのコストは 1,000 円/1W 程度であり、800 円/1W 程度の太陽光発電にかなり近づいている。温度差がもう少し小さい場合でも、熱電発電システムのコストが太陽光発電並になれば、応用分野は大幅に拡大すると考えられる。

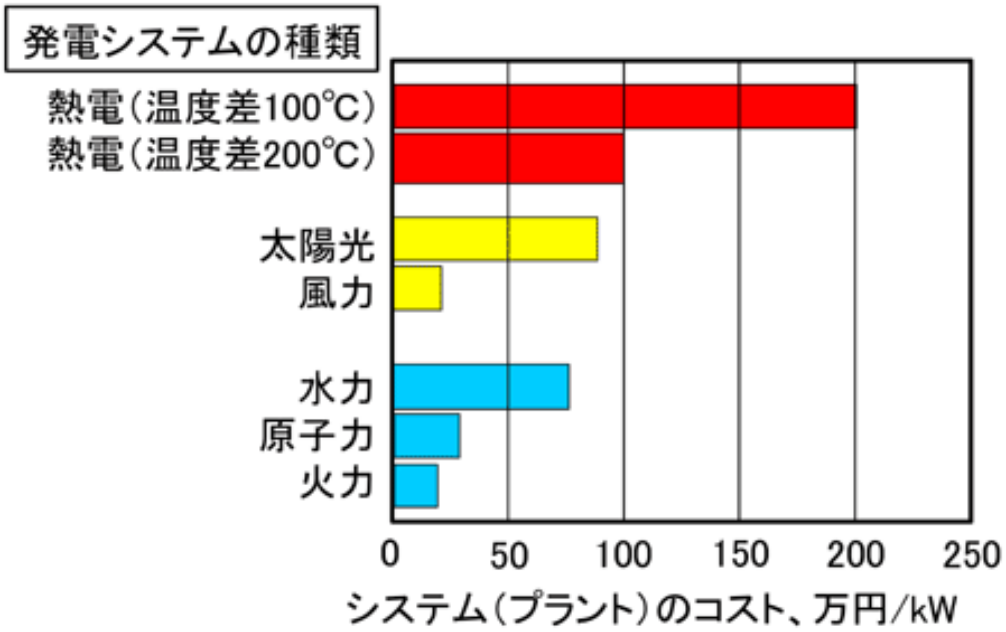


図 3-13 各種発電システム（プラント）のコスト
（参考文献[3-10]より引用）

3.2 リスク評価と安全基準の検討

3.2.1 想定されるリスクと安全対策の整理

熱電発電システムに関するリスクの評価と安全基準の検討を行うために、まずは想定されるリスクを把握するために、ハザードの抽出を委員の協力を得て検討した。

検討の成果として得られたハザード分析表を、表 3-1 に示す。

今回の検討では、フェーズを、設置時、運用時、撤去時に分けて検討している。そして、それぞれのフェーズにおけるソース（発生源）を、設備、人的要因、環境要因の 3 つに分け、それぞれの観点から考えられるソースを、できる限り抽出した。

抽出したソースにより発生する可能性がある事象を「可能性がある事象」に記入し、その事象により人体、資産、環境に対して与えられる可能性がある危害を、「可能性がある危害」に記入した。

ここまでが、ハザード（危険状況の）抽出である。この状態は、基本的に安全対策を行っていない状態でのハザード抽出である。できるだけ漏れなく安全対策を考えるためには、できるだけ漏れなくハザードを抽出しておくことが第一であるため、特別な安全対策を行う前の状態でハザードを抽出するのが基本である。

1.4.2 で説明したリスクグラフ法の考え方に基づき、この抽出したハザードに対して、4 つのリスクパラメータを、委員の意見を伺いながら割り振った。4 つのリスクパラメータとは、「危険の程度」、「危険状態の頻度」、「回避可能性」、「危険事象の発生確率」である。

リスク等級は、入力したリスクパラメータから自動的に決まる。安全対策に関しては、リスクパラメータに対応して考えられる安全対策を示している。ただし、安全対策に関しては、技術レベルや費やせるコストにより、様々な方法が考えられるとともに、対策の対象とする

設備の詳細が決まっていない段階では、具体的な安全対策を示すことは難しいため、ここでは考えられる一般的な対策の方向性を示している。

実際の発電システムを開発する際には、リスクパラメータからリスク等級が決まった段階で、リスクの高い事項から優先して安全対策を行い、対策を行った（あるいは決まった）段階で、対策後のリスクアセスメントを行うことになる。対策後のリスクアセスメントを実施し、対策前のリスク等級が、許容できるレベルになっているかどうかを確認する。

今回のリスク分析では、実際の発電システムを開発する訳ではないため、現在の状態でのリスクの評価を行っている。ただし、リスクを評価するためのハザード分析の切り口は、一般的な熱電発電として必要とされる構成に基づいて考えているため、将来的に熱電発電のリスク評価を実施す際には、スタート段階で参照するもの、あるいは設計内容から安全レビューを実施する際に参照するものとして、有効なガイドラインとして使用できるものと考えられる。

3.2.2　主なハザードと安全対策

(1) 設置フェーズ

1) 主なハザード

- 設置時には様々なハザードが存在する。特に熱電モジュールは数 10 キロの重量物であるため、設置にあたっては、クレーン等で引き上げる必要があるため、落下の危険性を伴っている。

- 熱電モジュールは必ず高温部と低温部に挟み込まれる構造となる。隙間があると目的通りに発電できないため、何かしらの力で押しつけることが必要とされる。スプリング等の力で押し付ける場合には、スプリングが外れてはじけ飛ぶことにより、冷却板、受熱板、熱電モジュール等が外れて落下する危険がある。

- 熱電モジュールは温度差が存在すると発電する。そのため、冷却水が流れたりすることで温度差が発生すると、即座に発電が開始され、電位差が発生する。スイッチをオフにすることで停止できる性質のものでないため、急な発電が発生した際に人が存在すると、感電の可能性がある。

- 人的要因による数多くのハザードが存在する。設置作業を自動化することは難しいため、作業者が構成要素に接触することは避けられない。また、人が関与する以上、人のミスを完全に防止することも困難である。

- 環境要因のハザードとしては、降雨、雷、地震を上げている。プラントの排熱を利用する場合には、熱電モジュールを高所に設置することが必要とされ、人が作業中に地震が発生した場合には、落下等の危険性が考えられる。

2）安全対策の方向性

- 構成要素の落下や弾け飛びによる傷害を防止する対策が必要とされる。
- 本質的な安全対策としては、できるだけ高所の作業が必要とない構成とすることが対策となる。地震等の環境要因に対する対策としても有効である。
- 落下を防止するために、確実な取っ手等を用意することが必要とされる。
- 設備作業手順を明確にし、それぞれの手順における危険性と、注意するべき点をまとめて設備作業手順書として作成し、作業者に定着されることは有効な対策と考えられる。
- 必要に応じて、設備作業手順を改善して、よりリスクが低い手順とすることも有効である。
- 感電する危険性が存在する領域に立ち入る場合には、ロックアウトタグアウトの対策を行い、人が立ち入っていることを明確にするとともに、立ち入っている場合には危険が発生しない状態を保持する対策を行うことが求められる。

(2) 運用フェーズ

1）主なハザード

- 定常状態で運用されている状態においては、人が近づく必要がないため、人に危害が及ぶリスクは小さいと考えられる。
- シール部の劣化による水の侵入によるショートや、ケーブル劣化による漏電により火災が発生する可能性はあるが、発生する可能性は低く、通常は人が存在しない場所であるため、人への危害発生の可能性は低いと考えられる。
- 保守作業を実施する際には、作業者が発電システムに近づくことが必要となるため、人への危害が発生する可能性が高くなる。
- 保守作業中には人的要因にハザードが存在する。保守作業は作業者により行うことが必要であるため、人のミスを完全に防止することは困難である。ミスが発生する可能性がある作業を不要な構造とするなどの本質的対策が求められる。
- 環境要因のハザードとしては、降雨、雷、地震を上げている。プラントの排熱を利用する場合には、熱電モジュールを高所に設置されることが多く、人が作業中に地震が発生した場合には、落下等の危険性が考えられる。

2）安全対策の方向性

- 保守作業時には、作業者が発電システムに近づくことが必要となるため、設置フェーズと同様に落下等に対する対策が必要とされる。

- 本質的な安全対策としては、できるだけ高所の作業が必要とない構成とすることが対策となる。地震等の環境要因に対する対策としても有効である。
- 保守作業者が危険な領域に立ち入らないように、立ち入り禁止の措置を徹底して行うことが必要とされる。
- 保守作業の必要性から危険性が存在する領域に立ち入る場合には、ロックアウトタグアウトの対策を行い、人が立ち入っていることを明確にするとともに、立ち入っている場合には危険が発生しない状態を保持する対策を行うことが求められる。

(3) 撤去フェーズ

1) 主なハザード

- 撤去フェーズにおける設備に関するハザードは、基本的には設置フェーズと同様と考えられる。環境要因に関するハザードも、設置フェーズと同様と考えられる。
- 撤去作業は発電を停止した状態で実施することになるため、接続や切り替えのミス等のハザードは存在しないと考えられる。作業ミスによる残留物の発生がハザードとして考えられる。

2) 安全対策の方向性

- ハザードに対応して、基本的には、設置フェーズと同様の対策の実施が求められる。

表 3-1 熱電発電システムに関するハザード分析表

ハザード（危険状況）					リスクパラメータ				リスク等級	安全対策			
フェーズ	ソース（発生源）		可能性がある事象	可能性がある危害	危険の程度 S1：軽度 S2：重度	危険状態の頻度 F1：稀 F2：頻繁	回避可能性 A1：可 A2：不可	危険事象の発生確率 O1：低い O2：中程度 O3：高い		ソース（発生源）を取り除く 危害の程度を下げる	危険状態の頻度を下げる	回避可能性を高める	事象の発生確率を下げる
設置時	設備	発電サブシステム	火炎放出口周りにクレーンやユニックまたは人力でロープで引き上げ時に落下する	機器の破損及び作業員・第三者への傷害	S2	F1	A1	O2	2	落下防止策の徹底、低所設置の検討	設置作業手順の改善	落下防止機構の追加（防護ネット設置等）	つり下げ用取っ手を設ける
		熱電発電機	発電機を八の字に設置するときなど設置時に発電機間に挟まれる	作業員への傷害	S2	F1	A1	O3	3	可動機構の排除、設計変更	設置作業手順の改善	アラート機能の拡充	
		発電サブシステム	発電機カバーまたは発電機本体の角部による引っ掛け	作業員および第三者への傷害	S1	F2	A1	O3	2	部材の角部を丸みの形状に処理	設置作業手順の改善		
		熱電発電機	水冷板、受熱板固定のためのスプリングが弾け飛ぶ	作業員および第三者への傷害	S2	F1	A2	O3	4	スプリング機構の廃止	設置作業手順の改善		スプリング保持機構の改善、強度確保保護具の装着
		熱電発電機	冷却水を流すことで起電力発生	作業員および第三者の感電	S2	F1	A1	O3	3		設置作業手順の改善		ロックアウトタグアウト
		送変電サブシステム	絶縁試験時チャージ残留による高電圧化	作業員および第三者の感電	S1	F1	A1	O2	1		設置作業手順の改善		絶縁試験法の改良
		送変電サブシステム	電力変換ユニット搬入時に転倒	作業員および第三者の負傷	S1	F1	A1	O2	1	パワコンの小型化	設置作業手順の改善		
		冷却系	配管継ぎ手からの漏水	既存構造物電気系を短絡させ、火花発生から火災に至る。	S2	F1	A1	O2	2	継手の設計変更、締結作業方法の変更	設置作業手順の改善	耐水絶縁機構の追加	配管ヶ所の削減
	人的要因	ブレーカー	作業ミスにより稼動試験前のブレーカーON にする	室温と水冷板との温度差で発電し、配線が活線になることによる作業員および第三者の感電。	S2	F1	A2	O2	3		確認の徹底等、作業手順の改善	絶縁工具、作業道具の使用徹底	ブレーカースイッチをロックアウト・タグアウト
		ガス系	高圧窒素導入による熱電発電機の破裂	飛散物により作業員・第三者への傷害および他設備の破損	S1	F1	A2	O2	1	コネクタ形状変更によりミスを排除	確認の徹底等、作業手順の改善	作業圧力の低減	レギュレータ設置
		ガス系	・高圧エア導入による熱電発電機の破裂 ・高圧エア導入によりエア中のオイルミストが電気部品に侵入	飛散物により作業員・第三者への傷害および他設備の破損 漏電から火災が発生し、作業員・第三者火傷および他設備の火災被害	S1	F1	A2	O2	1	コネクタ形状変更によりミスを排除	確認の徹底等、作業手順の改善	作業圧力の低減	レギュレータ設置
		ガス系	水素など可燃性ガスの接続により熱電発電機の爆発	飛散物により作業員・第三者への傷害および他設備の破損	S1	F1	A2	O2	1	コネクタ形状変更によりミスを排除	確認の徹底等、作業手順の改善	作業圧力の低減	バルブのロックアウトタグアウト
		送変電サブシステム	系統切替ミス（AC100V 出力に 200V 接続）	高温、火花発生により作業員が火傷する	S1	F1	A2	O2	1	電圧の単一化	確認の徹底等、作業手順の改善	防護装置の設置	プラグをロックアウト・タグアウトする
		熱電発電機	設置中に誤って運転する	作業員・第三者の火傷	S1	F1	A1	O1	1	フェールセーフシステム	確認の徹底等、作業手順の改善		起動スイッチをロックアウト・タグアウト

ハザード(危険状況)					リスクパラメータ				リスク等級	安全対策			
フェーズ	ソース(発生源)		可能性がある事象	可能性がある危害	危険の程度 S1:軽度 S2:重度	危険状態の頻度 F1:稀 F2:頻繁	回避可能性 A1:可 A2:不可	危険事象の発生確率 O1:低い O2:中程度 O3:高い		ソース(発生源)を取り除く 危害の程度を下げる	危険状態の頻度を下げる	回避可能性を高める	事象の発生確率を下げる
	環境要因	降雨	雨漏り水による漏電	短絡電流により、火災が発生し、作業員および第三者が火傷する	S1	F1	A2	O1	1	雨漏り排除	設置作業手順の改善		
		雷	落雷による設備の火災	作業員および第三者の負傷	S2	F1	A2	O1	2	避雷機構の設置	設置作業手順の改善		
		地震	壁掛け電力変換ユニットが落下する	作業員および第三者の負傷	S1	F1	A1	O2	1	床置にする	設置作業手順の改善		
		地震	熱電発電機、架台が落下する	作業員および第三者の負傷	S2	F1	A2	O2	3	低所設置の検討	設置作業手順の改善		
運用時	設備	熱電発電機	保守作業時に落下する	作業員および第三者への傷害	S2	F1	A1	O1	1		立入禁止等の措置の徹底		
		熱電発電機	保守作業時に角部による引っ掛け	作業員および第三者への傷害	S1	F2	A1	O1	1		立入禁止等の措置の徹底		
		熱電発電機	水冷板、受熱板固定のためのスプリングが弾け飛ぶ	作業員および第三者への傷害	S1	F1	A2	O1	1	設計変更、改良が必要	立入禁止等の措置の徹底		
		熱電発電機	シール部劣化により、水滴が進入し、電極部沿面距離不足による地絡	火災が発生し、作業員および第三者が火傷	S1	F1	A2	O2	1	劣化耐性が高い製品の採用	立入禁止等の措置の徹底		
		送変電サブシステム	ケーブル劣化による漏電	火災が発生し、作業員および第三者が火傷	S1	F1	A2	O2	1	劣化耐性が高い製品の採用	立入禁止等の措置の徹底		難燃ケーブル採用
		冷却系	配管継ぎ手からの漏水	既存構造物電気系を短絡させ、火花発生から火災に至る。	S1	F1	A2	O2	1	劣化耐性が高い製品の採用	点検による漏水検知 立入禁止等の措置の徹底		火花発生可能性箇所を金属のケースで覆う
		架台	地震や経年変化により発電/退避位置移動のための稼動部と既存構造物の干渉。	作業員および第三者への傷害	S1	F1	A1	O2	1		立入禁止等の措置の徹底		
		退避機構	保守作業中に、退避/発電位置移動中に気づかずに挟まれる	作業員への傷害	S2	F1	A1	O3	3		立入禁止等の措置の徹底		タグアウト及び警報
		退避機構	温度センサーが破損し、仕様以上の高温になっても退避しない	火災が発生し、作業員および第三者が火傷	S1	F1	A1	O2	1	危険検出型から安全確認型の対策必要	立入禁止等の措置の徹底	B 接点による	センサーの信頼性を高める 冗長性を高める
		退避機構	水量センサーが破損し、仕様以上の高温になっても退避しない	火災が発生し、作業員および第三者が火傷	S1	F1	A1	O2	1	危険検出型から安全確認型の対策必要	立入禁止等の措置の徹底	B 接点による	センサーの信頼性を高める 冗長性を高める
		退避機構	退避機構のアクチュエータorバルブの不具合や経年による駆動軸変形が発生し、仕様以上の高温になっても退避しない	火災が発生し、作業員および第三者が火傷	S1	F1	A1	O2	1		立入禁止等の措置の徹底	無駆動力でも退避する機構	

ハザード（危険状況）									リスク等級	安全対策			
フェーズ	ソース（発生源）		可能性がある事象	可能性がある危害	危険の程度 S1：軽度 S2：重度	危険状態の頻度 F1：稀 F2：頻繁	回避可能性 A1：可 A2：不可	危険事象の発生確率 O1：低い O2：中程度 O3：高い		ソース（発生源）を取り除く 危害の程度を下げる	危険状態の頻度を下げる	回避可能性を高める	事象の発生確率を下げる
撤去時	人的要因	作業員のミス	低圧窒素ラインに高圧窒素が導入される	熱電発電機が破裂し、飛散物により作業員および第三者への傷害	S1	F1	A2	O1	1	高圧窒素使用の廃止	作業手順の徹底	隔離距離を確保	レギュレータ設置 作業員への指示徹底
		作業員のミス	低圧窒素ラインに高圧エアが導入される	熱電発電機が破裂し、飛散物により作業員および第三者への傷害	S1	F1	A2	O1	1	高圧空気の使用廃止、電動化	高圧空気の使用廃止、電動化	隔離距離を確保	レギュレータ設置 作業員への指示徹底
		作業員のミス	低圧窒素ラインに高圧エアが導入される	エア中のオイルミストが電気部品に侵入し、漏電から火災が発生し、作業員および第三者火傷	S1	F1	A2	O1	1	高圧空気の使用廃止、電動化	高圧空気の使用廃止、電動化	隔離距離を確保	レギュレータ設置 作業員への指示徹底
		作業員のミス	作業中に熱源となる既存構造物を運転する	作業員および第三者の火傷	S2	F1	A1	O3	3	既存構造物の運転停止	高圧空気の使用廃止、電動化	隔離距離を確保	起動スイッチをロックアウト・タグアウト 作業員への指示徹底
	環境要因	降雨	雨漏り水による漏電	短絡電流により、火災が発生し、作業員および第三者が火傷する	S1	F1	A2	O2	1	雨漏りの修繕	立入禁止等の措置の徹底		
		雷	落雷による設備の火災	作業員および第三者の負傷	S2	F1	A2	O1	2	避雷機構の設置	立入禁止等の措置の徹底		避雷針の設置
		地震	壁掛け電力変換ユニットが落下する	作業員および第三者の負傷	S1	F1	A1	O1	1	低所設置の検討	立入禁止等の措置の徹底		
		地震	熱電発電機、架台が落下する	作業員および第三者の負傷	S2	F1	A2	O1	2	低所設置の検討	立入禁止等の措置の徹底		
	設備	発電サブシステム	作業時に落下する	作業員および第三者への傷害	S2	F1	A1	O3	3		作業手順の見直し		つり下げ用取っ手を設ける
		熱電発電機	作業時に挟まれる	作業員への傷害	S1	F1	A1	O3	2		作業手順の見直し		
		発電サブシステム	角部による引っ掛け	作業員および第三者への傷害	S1	F1	A1	O3	2	部材の角部を丸みの形状に処理	作業手順の見直し		
		熱電発電機	水冷板、受熱板固定のためのスプリングが弾け飛ぶ	作業員および第三者への傷害	S2	F1	A2	O3	4		作業手順の見直し		保護具の装着
		熱電発電機	冷却水を流すことで起電力発生	作業員および第三者の感電	S2	F1	A1	O3	3		作業手順の見直し	感電対策の徹底	ロックアウトタグアウト
		冷却系	配管継ぎ手からの漏水	既存構造物電気系を短絡させ、火花発生から火災に至る。	S2	F1	A2	O2	1	排水後作業の徹底	作業手順の見直し		
		送変電サブシステム	電力変換ユニット搬出時に転倒	作業員および第三者の負傷	S1	F1	A1	O2	1		作業手順の見直し		
		架台	架台と一体化した既存構造物の安全装置が架台撤去により動作しなくなる。	作業員および第三者への傷害	S1	F1	A1	O2	1	既存構造物の安全装置の修正			
	人的要因	作業員のミス	残留物を残す	残留物が加熱され火災が発生し、第三者が火傷	S1	F1	A1	O1	1		作業の徹底指示		
	環境要因	降雨	雨漏り水による漏電	短絡電流により、火災が発生し、作業員および第三者が火傷する	S1	F1	A2	O2	1	雨漏りの修繕			
		雷	落雷による設備の火災	作業員および第三者の負傷	S2	F1	A2	O2	2	避雷機構の設置			
		地震	壁掛け電力変換ユニットが落下する	作業員および第三者の負傷	S1	F1	A1	O1	1				落下防止策の追加
		地震	熱電発電機、架台が落下する	作業員および第三者の負傷	S2	F1	A2	O2	3				落下防止策の追加

3.2.3　リスク評価および安全基準の検討の係る留意事項

熱電発電のハザード分析表に基づき、熱電発電システムの安全性に関して検討すべき事項について、今回の委員会の委員にご指摘をいただき、将来に向けての検討における留意事項としてまとめる。

今後、ハザード分析を実施するにあたっては、下記の観点からの分析も行うことが必要とされる。

(1) 機能ストレスによるハザード

- 設置において、不定形重量物の取り扱いに伴う取り付け失敗時の本体や部材の落下による設備および人員の損傷は、位置エネルギーによるものであり、位置エネルギーを減少するとう観点での検討も必要である。
- 熱電ユニットの固定部に使用されているバネやゴムの不具合に伴い、設備及び人員の損傷が考えられるが、機械エネルギーを低減するという観点からの検討が必要と考えられる。
- 熱電ユニットの内部環境として、高圧なガスの状態、およびそれを減圧する状態における危険について考慮することが必要とされる。
- 熱電ユニットの温度差や熱流供給に伴う電力発生により機器破損と人員の破損が考えられる。熱電発電システムは、温度差さえあれば発電を行う。つまり発電開始のスイッチは存在せず、常に発電を行うことになるため、それを考慮した分析が必要である。

(2) 時間要素に関わるハザード

- 長期劣化の原因としては、固相拡散、酸化反応、水分進入の原因が考えられる。固相拡散とは、接触した異なる金属の境界において、両方の金属が反応して新たな物質を作ってしまうことで、初期の性能を発揮できなくなる事を考えている。
- 突発的起動や遮断、あるいは電圧・電流の急変が繰り返し発生することによる機器破壊が考えられる。

(3) 他のシステムとのインターフェース条件に起因するハザード

- 高温熱源ブロアー故障による供給急変による影響により、システムへの悪影響が考えられる。
- 放熱部水系または空気系の供給断により、熱電ユニットの破壊や損傷が考えられる。
- 短絡や開放による外部負荷の急変によって電圧・電圧が急変する可能性が考えられる。

4. 床発電

4.1 国内外の技術動向

人が歩行して通過する床に発電装置を組み込み、人が床に体重をかけたり離したりする動きにより発電を行う「床発電」の試みが、国内外で行われている。

床発電の仕組みとして現在、実際に発電するシステムとして構築されているものとしては、圧電式タイプと機械式タイプの 2 つがある。圧電式タイプは、人が床を歩くことで圧電素子に圧力が加わる構造とし圧電素子により発電するものである。機械式タイプは、人が踏むことで発生する床の上下運動を回転運動に変換することで発電するものである。

発電量は圧電式タイプよりも機械式タイプが大きく、機械式タイプは圧電式タイプに比べて、人間の 1 歩あたりの発電量が約 1,000 倍と言われている。

床発電システムのメリットとしては、電源配線工事を行わなくても電気を得ることができるという点があげられる。このため、仮設物の電源や、ビルや通路において、照明やセンサー、あるいは電子ペーパー等の表示等に利用可能と考えられる。また、他に類を見ない「参加型」の発電技術であるため、スポーツ観戦等におけるイベント的な利用方法が注目されている。[4-1]

以下、この 2 つの床発電システムについて説明する。

4.1.1 圧電式タイプの床発電システム

床発電システムは、人が歩行の際に床を踏むエネルギーを電気に変換しようとするものであるが、圧電式タイプにおける技術の核は圧電素子（図 4-1）の持つ圧電効果である。圧電効果とは、素子に応力を加えると素子内部で分極が起こることで浮遊電荷が発生し、素子が力から開放された際にその電荷が放出されることで電流が発生する現象である（図 4-2）。[4-1]

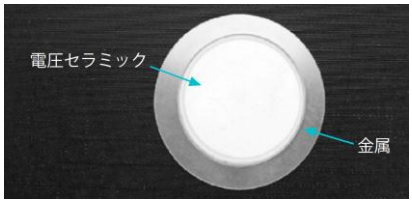


図 4-1 圧電素子
（参考文献[4-1]より引用）

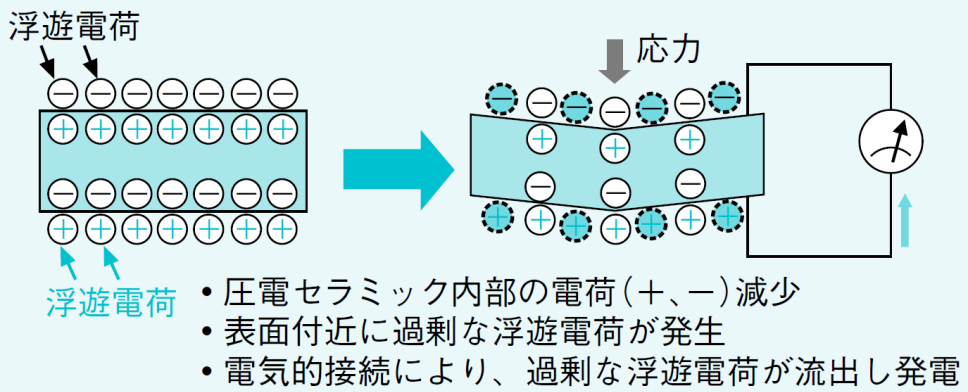


図 4-2 圧電効果の原理
（参考文献[4-1]より引用）

床発電システムは、力や振動により発電する「圧電素子」、圧電素子を保護し力を加えるための「発電ユニット」、発生した電力を取り出す「蓄電制御装置」で構成される。複数の圧電組織を組み込んだ発電ユニットを床に敷設し、発電ユニットが踏まれることで発生した電力が、蓄電制御装置に蓄積される（図 4-3）。[4-2]

図 4-4 はサッカースタジアムに導入された床発電システムの構成を示している。サッカースタジアムの観客席 1 席に 1 枚の発電ユニットを設置できるように、発電ユニット 4 枚を 1 列として観客席の足元に設置している。設置に際しては、狭い座席にコンパクトに、また確実に固定できるよう図 4-5 に示すような外枠フレームを使用した構成を用いている。ここでは、上下の外枠フレームの間に、表面材と発電ユニットからなる床材タイルを挟み込み、外枠フレームを床に固定するようにしている。図 4-6 に発電ユニットの構成を示す。ゴムでできた下面保護材の上に発電素子を並べ、ゴムでできた上面保護材を上に重ねる。さらにその上に床材タイルを重ねる構成になっている。床材タイルを人が踏むことで上面保護材を下に押し込み、圧電素子に圧力がかかることで電気が発生する。

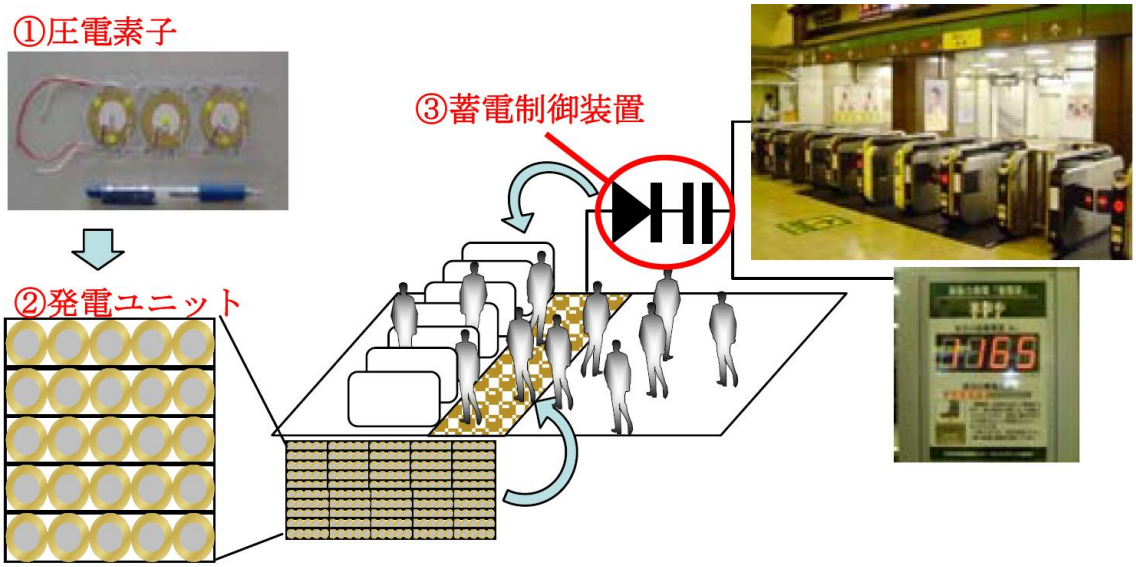


図 4-3 床発電システムの構成
（参考文献[4-2]より引用）

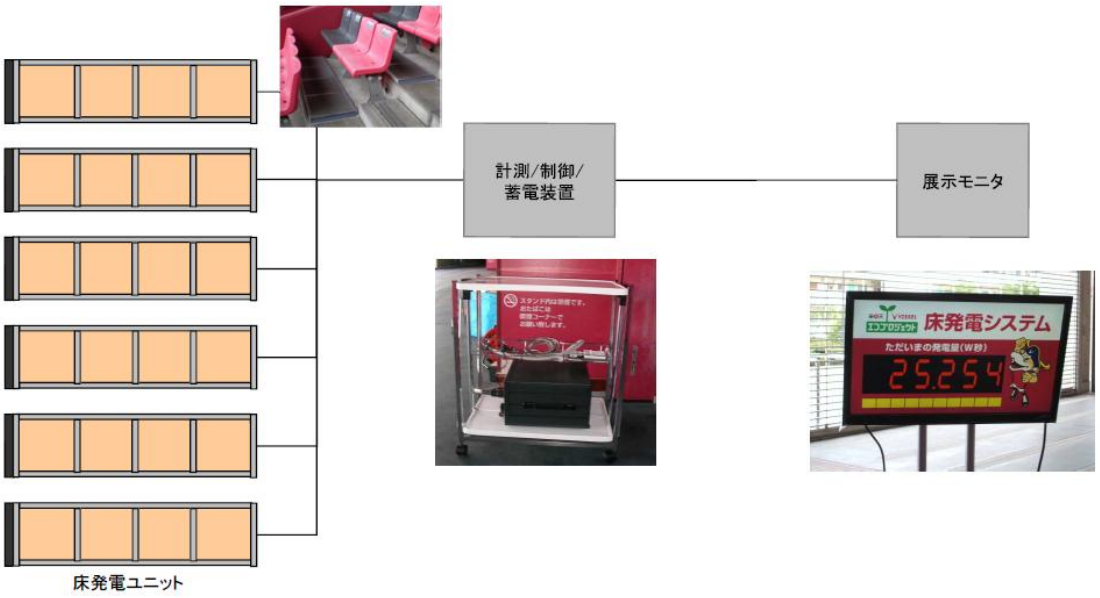


図 4-4 床発電システムの設置構成
（ジェイアール東日本コンサルタント提供）

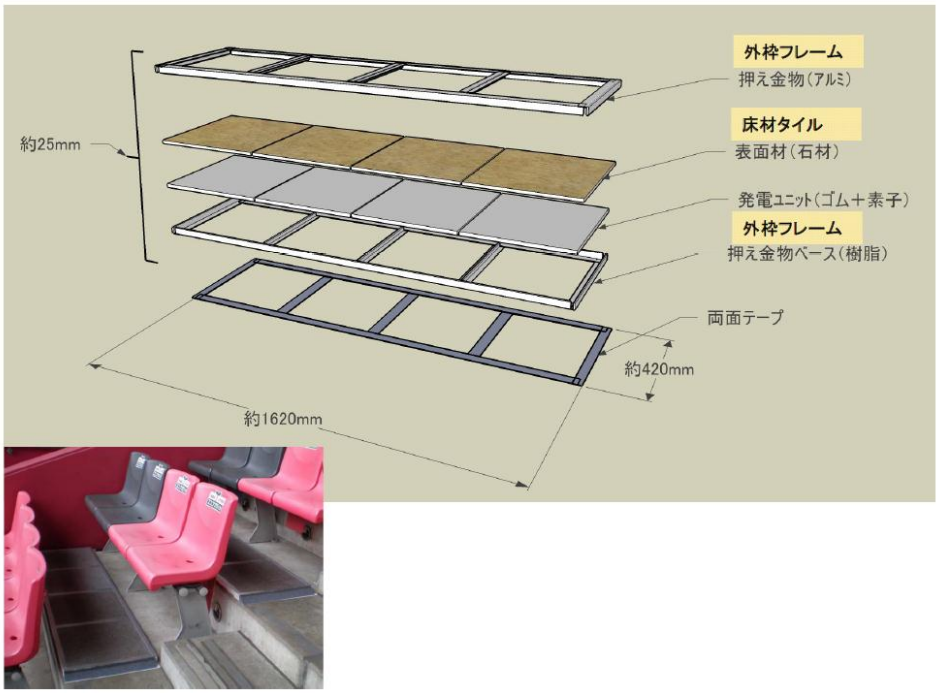


図 4-5 外枠フレームの構成
（ジェイアール東日本コンサルタント提供）

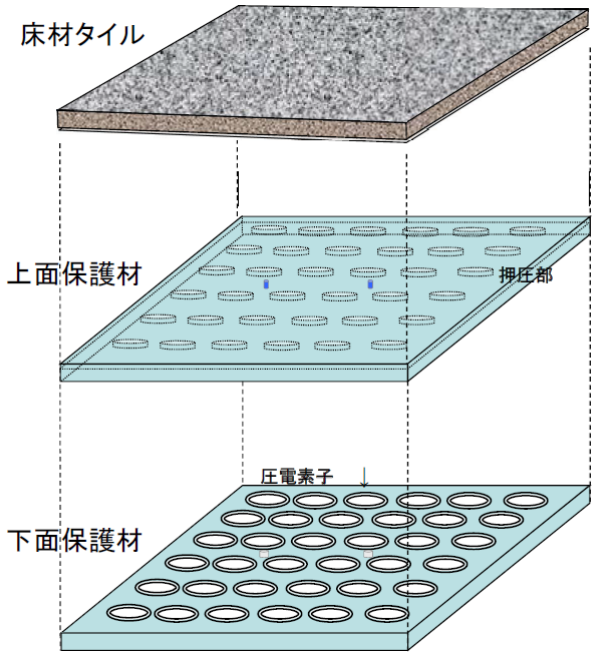


図 4-6 床発電ユニットの構成
（ジェイアール東日本コンサルタント提供）

床発電システムの開発は、2004 年度から慶応義塾大学 武藤教授とジェイアール東日本コンサルタンツ（株）により基礎研究が開始され、2005 年度の JR 東京駅丸の内改札での実験を経て、2007 年 6 月から 2009 年 3 月まで、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)との共同開発として、「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」の事業として取り組まれた[4-1]。

最近では、鉄道分野以外においても利用分野が広がっており、上海国際博覧会日本館、サッカースタジアムにおける応援スタンドへ導入されている[4-1]。

圧電素子の特徴は高い電圧と高インピーダンスの出力であるが、発電量は小さい。それを改良するために、2006 年度から 2008 年度にかけて、3 回の実証試験が行われた。この 3 回の実証試験における発電量の推移と発電能力の持続性(耐久性)を図 4-7、図 4-8 に示す[4-3]。

この実証試験は、JR の改札に設置された床発電システムにより行われたが、図 4-7 に示されるように、発電量は 3 年間で 40 倍に向上している。発電用途に向けた圧電素子の開発と圧電素子に圧力を加える構造の改良によるものである。発電量の算出にあたっては、開札における総発電量を通行人数で割ることで、1 人が改札機（約 2.5m）を通過した時の発電量を算出している。耐久性については、発電能力の持続性を指標として評価されているが、2006 年度(平成 18 年度)には試験開始後約 3 週間の時点で 3 分の 1 になっていた発電量が、平成 20 年度には 3 週間後においても 95%を保っていられるように改善された。

2006 年度の段階では、10 歩で 47μF のキャパシタが 8V に充電できる状態であり、圧電素子の発電量としては、0.15mWs/歩（1 歩あたりの発電量）であったが、2008 年度の段階では 40 倍の性能となり 6mWs/歩になっている[4-4]。1Ws は 1Joule である。

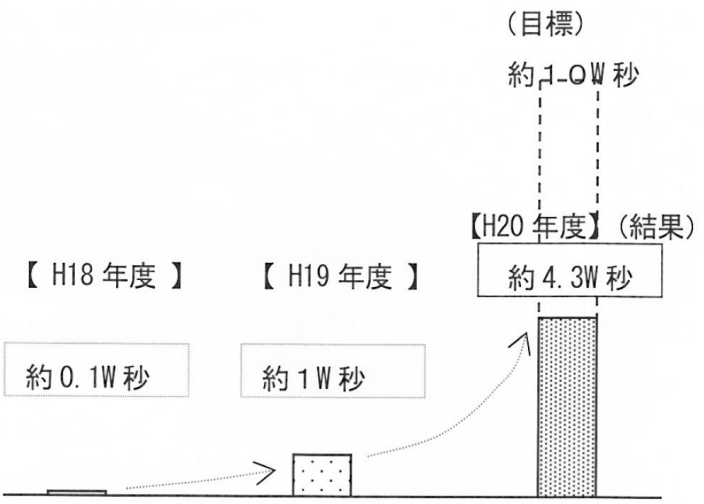


図 4-7 開発1人通過あたりの発電量
（参考文献[4-3]より引用）

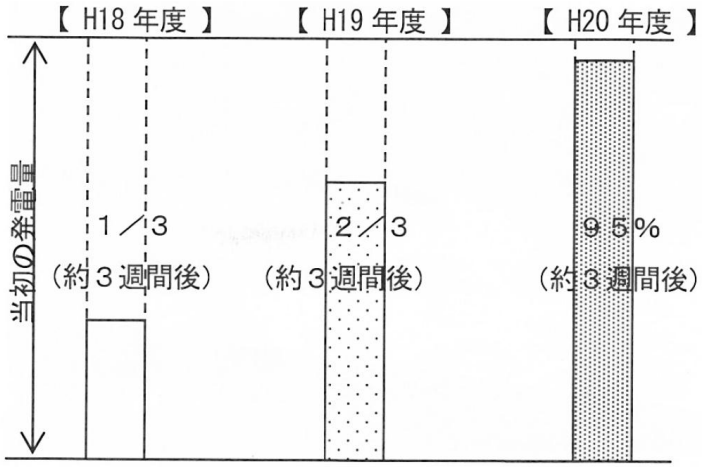


図 4-8 発電能力の持続性
（参考文献[4-3]より引用）

4.1.2 機械式タイプの床発電システム

英国の Pavegen System 社（以下、ペーブジェン社）により開発された床発電システムは、人が踏むことにより 5mm 程度沈み込み、その上下運動を機械的に回転運動に変換して発電するシステムである。日本では、（株）アサボウ[9]が総代理店として販売を担当している。

ペーブジェン社の床発電システムはパッケージ化されており、それを単独あるいは複数並べて設置される。基本的な仕様を表 4-1 に示す。[4-5]

[9] （株）アサボウ http://www.asaboh.com/

表 4-1 ペーブジェン基本仕様

商品名	ペーブジェン
生産者	Pavegen Systems 社[10]（イギリス）
発電量	4～7Ws（成人による 1 歩あたり）
出力	直流 12V（バッテリーへの給電も可能）
質量	28kg（1 枚あたり）
寸法	L 600mm X D 450mm X H 82mm（仕様変更可能）
構成材	路面：再生ゴムを主原料としたマット（仕様変更可能） 内部：再生アルミニウム、ステンレススチール　他
耐久性	工業試験 300 万歩　実地試験 4000 万歩　点荷重 20kN まで
使用環境	屋内／屋外 （高気温、低気温、高湿度の条件下では十分な性能を発揮できない場合がある）

（参考資料[4-5]より引用）

図 4-9 にペーブジェンのパッケージを示す[4-6]。このパッケージを路面に設置し、その上を人が歩くことで発電することができる（図 4-10）[4-6]。

床面は人が踏むことで 5mm 程度沈み込み、人が離れると上昇する。この上下の動きが内部に組み込まれたユニットにより回転方向に変換され電気が発生する。発電の仕組みについては公表されていない。

図 4-9 ペーブジェンのパッケージ
（参考文献[4-6]より引用）

10 Pavegen Systems Ltd. http://www.pavegen.com/

図 4-10 路面に設置されたペーブジェン
（参考文献[4-6]より引用）

ペーブジェンが十分な強度を持っていることを確認するため､ペーブジェン社では英国の独立した認定検査機関である BTL（Building Testing Limited）[11]による負荷試験を実施している。その試験では、以下に示すような A）～E）の 5 つ状況を設定し、その状況を再現する負荷条件による試験を実施し、問題ないことを確認している[4-7]。

A） 静的荷重 3kN/m - 25mm×25mm に 0.81kN が負荷したことに相当

B） 実荷重 7kN/m - 25mm×25mm に 1.89kN が負荷したことに相当

C） シミュレーション荷重 2.5kN - 標準的な街の清掃車が 100mm×75mm を横切った状態

D）シミュレーション荷重 3.68kN - 平均的な道路車両が 185mm×70mm を横切った状態

E） インパクト試験 - パネル中心に 1m の高さから 80kg の人間が飛び降りた衝撃

これらの試験に加えて、より大きな荷重が加わる場合の試験として、100mm×75mm のプレートを使用し、最大 2 トンの荷重をかけて異常がないことを確認している。また、スティレットヒール（とがった金属製ヒールを持つハイヒール）の靴をシミュレートするため、小さいプレートで荷重を加え、15kN を加えても問題ないことを確認している。また、平均的な人間の足踏みをシミュレートするため、1,000,000 ステップを試験機で加えて確認している。

ペーブジェンは欧州指令の一つである EMC 指令（2004/108/EC）に適合している[4-7]。EMC 指令は 1996 年に適用された制度であり、EU 域内を流通する全ての電気電子機器、設備に適用される指令である。EMC 指令では、その機器が発生する電磁波が、他の通信機器等の使用を妨げないことと､電磁波に対して一定レベルの抵抗力を有していることの両面が要求されている。このため、EMC（Electromagnetic Compatibility）は電磁両立性と呼ばれている。

EMC 指令の適合評価には、EMC 指令の整合規格である EN 規格が用いられる。ペーブジェンは、以下の整合規格に適合している[4-7]。

EN 61000-6-1:2007 Electromagnetic compatibility （EMC）-- Part 6-1: Generic standards - Immunity for residential, commercial and light-industrial environments IEC 61000-6-1:2005

[11] Building Testing Limited (BTL) http://www.buildingtesting.co.uk/

EN 61000-6-3:2007 Electromagnetic compatibility （EMC）-- Part 6-3: Generic standards - Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments IEC 61000-6-3:2006

4.1.3　床発電利用の今後の動向

床発電システムの利用として、将来的に期待されている領域としては、イベント等で利用する分野と、エネルギーハーベストとしての発電分野が考えられる。

イベント等の来場者に対して、発電を体感させるという点では、実際に身体を動かして、それが電気という形で見えるため、従来にない新しい体験を味あわせることができ、インパクトのある企画であると考えられる。

これまでにも、上海万博の日本館に設置された床発電システム[4-8]や、2013 年 12 月 12～14 日に開催されたエコプロダクツ 2013 に出展されたペーブジェン床発電システム[4-9]では、数多くの観客を集めたと言われている。

神戸市兵庫区にあるノエビアスタジアム神戸では、サポーターズシートの一部の床に床発電が導入されている。これは、サッカーの応援において特徴的な飛び跳ねて応援するサポータの振動により発電を行う新しい試みであり、楽天・ヴィッセル神戸エコプロジェクトの活動の一つとされている。[4-10]

シートの足元の床に設置された床発電システムの発電量により、ゲーム開始、ゴール、試合終了などのサポーターの興奮度をモニターすることができる。サポーターの興奮エネルギーは、床を踏むという力学的エネルギーで表現される[4-11]。床発電システムを導入することにより、サポーターの応援が発電に繋がり、これまでとは別の目に見える形で確認できるため、選手が奮起するとともに、応援の一体感が踏まれるなど、プラスの影響に繋がっていると言われている[4-10]。

このようなスポーツイベントでの観客の表現方法の一つとして、今後も、新たな適用法が登場してくることが予想される。

イベント等での床発電システムの利用は、基本的に独立した装置としての利用であり、外部の電気系統とは接続されていない。また、発電される電力量は小さいものであり、これまでに実施されてきた規模では、電気事業法の電気工作物には該当しないと考えられる。

ただし将来的には、床発電システムを大規模に設置し、さらにはそれをバッテリーに蓄電するシステムとして運用することも考えられ、その場合には、電気工作物の範囲となるシステムも出現する可能性がある。

4.2 リスク評価と安全基準の検討

4.2.1　想定されるリスクと安全対策の整理

床発電システムに関するリスクの評価と安全基準の検討を行うために、まずは想定されるリスクを把握するために、ハザードの抽出を委員の協力を得て検討した。

検討の成果として得られたハザード分析表を、圧電式タイプの床発電と、機械式タイプの床発電に分けて、表 4-2 および表 4-3 に示す。

各方式について、フェーズを分けてハザードを検討している。そして、それぞれのフェー

ズにおけるソース（発生源）、それぞれの観点から考えられるソースを、できる限り抽出した。

抽出したソースにより発生する可能性がある事象を「可能性がある事象」に記入し、その事象により人体、資産、環境に対して与えられる可能性がある危害を、「可能性がある危害」に記入した。

ここまでが、ハザード（危険状況の）抽出である。この状態は、基本的に安全対策を行っていない状態でのハザード抽出である。できるだけ漏れなく安全対策を考えるためには、できるだけ漏れなくハザードを抽出しておくことが第一であるため、特別な安全対策を行う前の状態でハザードを抽出するのが基本である。

1.4.2 で説明したリスクグラフ法の考え方に基づき、この抽出したハザードに対して、4つのリスクパラメータを、委員の意見を伺いながら割り振った。4 つのリスクパラメータとは、「危険の程度」、「危険状態の頻度」、「回避可能性」、「危険事象の発生確率」である。

リスク等級は、入力したリスクパラメータから自動的に決まる。安全対策に関しては、リスクパラメータに対応して考えられる安全対策を示している。ただし、安全対策に関しては、技術レベルや費やせるコストにより、様々な方法が考えられるとともに、対策の対象とする設備の詳細が決まっていない段階では、具体的な安全対策を示すことは難しいため、ここでは考えられる一般的な対策の方向性を示している。

実際の発電システムを開発する際には、リスクパラメータからリスク等級が決まった段階で、リスクの高い事項から優先して安全対策を行い、対策を行った（あるいは決まった）段階で、対策後のリスクアセスメントを行うことになる。対策後のリスクアセスメントを実施し、対策前のリスク等級が、許容できるレベルになっているかどうかを確認する。

今回のリスク分析では、実際の発電システムを開発する訳ではないため、現在の状態でのリスクの評価を行っている。ただし、リスクを評価するためのハザード分析の切り口は、一般的な床発電として必要とされる構成に基づいて考えているため、将来的に床電発電のリスク評価を実施す際には、スタート段階で参照するもの、あるいは設計内容から安全レビューを実施する際に参照するものとして、有効なガイドラインとして使用できるものと考えられる。

床発電システムにおいては、発生する電力が非常に小さいこともあり、電気的なリスクにおいて、リスク等級が 2 以上となるリスクは見つけられなかった。また、設置や撤去の作業の際のリスクに関しても、基本的に床に完成したユニットを設置するというシンプルな構成であることもあり、リスク等級が 2 以上となるリスクは見つけられなかった。

4.2.2　主なハザードと安全対策

(1) 設置フェーズ

1）主なハザード

- 床発電の発電モジュールは、圧電式でも機械式でもパッケージ化されており、必要に応じて複数のパッケージを並べて設置するようになっている。
- 一つの発電モジュールの重量は 10kg～30kg 程度である。厚労省の指針では、「満 18

歳以上の男子労働者が人力のみにより取り扱うモノの重量は、体重のおおむね 40%以下となるように努めること。」[4-12]とされており、男子労働者が一人で扱うことができる重量を超える可能性があるため注意が必要である。

- 床発電システムが設置される場所は、人が頻繁に通行する場所である。設置作業時に、作業者以外の人が近くに存在すると、思わぬ事故が発生する可能性がある。

2) 安全対策の方向性

- 設置時においては、重量物を扱う作業等、危険な作業が含まれるため、作業基準書等のマニュアルを作成し、それに基づき、事前に作業者に対して安全な作業の実施について教育を行うことが求められる。

- 設置作業にあたって専用の工具等が必要とされる場合には、マニュアルの中で使用方法等を説明することが必要である。

- 作業者以外の第三者が、設置作業場所に近づかないように、第三者が通行できる場所と作業領域を完全に分離する。作業領域の入り口には、常時監督者を置く等の方法で、許可されない人が入らないようにする対策が求められる。

(2) 運用フェーズ

1) 主なハザード

- 床発電システムで発電するためには、床の上を人が通行することが必要とされ、発電システムから人を隔離することはできない。そのため、発電システムのハザードへの暴露性(危険状態の頻度)は高くなる。

- 人に対する主なハザードの一つは感電であるが、発電量が小さいため、ショックを伴うような感電は発生しないと考えられる。

- 床がすべりやすい場合には、通行時に転倒する危険性が考えられる。特に雨等で濡れた状態になり、すべりやすくなった場合には危険性が高くなる。

- 人に対して直接的な障害を発生するものではないが、ユニットや部品の経年劣化による発火により火災が発生する危険性は考えられる。常に外部からの圧力が加わる状態で使用されるため、耐久性の低い部品等が使用された場合には、想定以上に劣化が早く進む可能性がある。

2) 安全対策の方向性

- 床のすべりやすさに関しては、乾燥時でも湿潤時でも、一定以上のすべりにくさが確保された床材を使用することが必要とされる。国交省で公表している「高齢者、障害者等の円

滑な移動等に配慮した建築設計標準」[4-13]等を参考として、すべりにくさの要求を設定することが必要とされる。

- 使用するユニットや部品の経年劣化については、実際に耐久試験を実施するか、調達先に対して耐久性を明確にしたうえで、性能が保証された部品を採用する方法が考えられる。耐久性については、使用する各部品のそれぞれについて、性能を明確に設定するか、適合するべき規格等を明示することが求められる。

(3) 撤去フェーズ

1) 主なハザード

- 撤去フェーズにおける設備に関するハザードは、基本的には設置フェーズと同様と考えられる。

2) 安全対策の方向性

- ハザードに対応して、基本的には、設置フェーズと同様の対策の実施が求められる。

表 4-2 床発電（圧電式タイプ）に係るハザード分析表

ハザード（危険状況）						危害の程度・発生確率				リスク等級	安全対策			
フェーズ		ソース（発生源）		可能性のある事象	可能性のある危害	危害の程度 S1：軽度 S2：重度	危険状態の頻度 F1：稀 F2：頻繁	回避可能性 A1：可 A2：不可	危険事象の発生確率 01：低い 02：中程度 03：高い		ソース（発生源）を取り除く	危険状態の頻度を下げる	回避可能性を高める	事象の発生確率を下げる
設計	荷重分散部	床材タイル	床材	表面が滑る。	歩行者が転倒する。	S1	F2	A1	01	1	使用する場所を考慮して設計する。		建築基準を適用する。	建築基準を適用する。
				床材が割れる。	人がつまづく。	S1	F2	A1	01	1	使用する場所を考慮して設計する。		建築基準を適用する。	
			鋼板	鋼板が変形する。	人がつまづく	S1	F2	A1	01	1	使用する場所を考慮して設計する。		建築基準を適用する。	
				鋼板が錆びる。	—	—	—	—	—					
	発電部	圧電素子	セラミックス	セラミックスが割れる。	発電量が低下する。	—	—	—	—				耐荷重を上げる。	
			金属	金属が変形する。		—	—	—	—				耐荷重を上げる。	
		電磁誘導	コイル	被覆ショートする。	発電停止する。	—	—	—	—		耐熱特性が良いコイルを使う。		JIS C 4003「電気絶縁―熱的耐久性評価及び呼び方」を適用する。	
			磁石	—	—	—	—	—	—					
		上面・仮面保護材	ゴム	劣化現象。	発電量が低下する。	S1	F1	A1	01	1			定期的に交換する。	
		配線	ケーブル	破断する。	静電気並みの電気ショック。	S1	F1	A1	01	1	高電圧対応品を追加う。		材質を丈夫にする。	定期的に検査する。
			コネクタ	接触不良を起こす。	静電気並みの電気ショック。	S1	F1	A1	01	1	高電圧対応品を追加う。		材質を丈夫にする。	定期的に検査する。
		回路	整流回路	設備の火災。	静電気並みの電気ショック。	S1	F1	A1	01	1	高電圧対応品を追加う。			定期的に検査する。
	蓄電部	蓄電回路	アルミ電解コンデンサ	トラッキングによる火花。	発熱・火災。	S1	F1	A1	01	1	高寿命、高温、高電圧対応部品を使う。		温度ヒューズ等を使用して過電流対策を行う。	定期的に点検・清掃する。
	外枠部	外枠	外枠フレーム	外枠が外れる。ゆがむ。移動する。	歩行者が転倒する。 歩行障害が生じる。	S1	F2	A1	01	1	材質を丈夫にする。			定期的に点検する。
施工	設置	組み立て	発電ユニット組み立て	発電ユニットのズレ。	ズレによる作業者の転倒。	S1	F1	A1	01	1	材質を丈夫にする。		より一層のユニット化を図る。	
		人的要因	施工ミス	システムの破損・故障。 発電停電。	ずれによる歩行者の転倒。	S1	F1	A1	01	1		より一層のユニット化を図る。	より一層のユニット化を図る。	より一層のユニット化を図る。
運用時	天候	環境要因	雨	発電部の浸水による故障。	発電停止。	S1	F1	A1	01	1	防水をする。			

表 4-3 床発電（機械式タイプ）に係るハザード分析表

ハザード（危険状況）					危害の程度・発生確率				リスク等級	安全対策			
フェーズ	ソース（発生源）		可能性のある事象	可能性のある危害	危害の程度 S1：軽度 S2：重度	危険状態の頻度 F1：稀 F2：頻繁	回避可能性 A1：可 A2：不可	危険事象の発生確率 01：低い 02：中程度 03：高い		ソース（発生源）を取り除く	危険状態の頻度を下げる	回避可能性を高める	事象の発生確率を下げる
設置時	設備	発電機	運搬時事故	重量物固定不良	S1	F1	A1	01	1	軽量化を図る			運搬時のトラックへの固定強化
			組み立て据付時事故	重量物落下	S1	F1	A2	01	1	軽量化を図る			玉掛け作業徹底
			設置調整時事故	隙間に身体の一部を挟む等の作業員の負傷	S1	F1	A2	02	1			保安用具の使用徹底	
		発電機関連設備	運搬時事故	重量物固定不良	S1	F1	A1	01	1	軽量化を図る		保安用具使用徹底	指定工具の使用
			組み立て据付時事故	重量物落下	S1	F1	A2	01	1	軽量化を図る			玉掛け作業徹底
			設置調整時事故	隙間に身体の一部を挟む等の作業員の負傷	S1	F1	A2	02	1			保安用具使用徹底	指定工具の使用
		システム関連設備	運搬時事故	重量物固定不良	S1	F1	A1	01	1			保安用具の使用徹底	
			組み立て据付時事故	重量物落下	S1	F1	A2	01	1				玉掛け作業徹底
			設置調整時事故	隙間に身体の一部を挟む等の作業員の負傷	S1	F1	A2	02	1			保安用具使用徹底	指定工具の使用
	設置場所	作業箇所及び周辺への安全防護柵等安全対策（滑り、つまづき、落下等の危険源及び複合要因を含む）	不適切な入場規制等	作業員及び第三者の負傷	S1	F1	A2	01	1		柵による作業場所の分離 関係者外立入禁止の設定		照明の確保
	環境要因	台風	発電機水没	設備の損傷	S1	F1	A1	01	1				防水性確保
			強風	作業員及び第三者の負傷	S1	F1	A1	01	1	現状の重量であれば強風でも飛ばない			
		地震	発電機の破損・故障による影響	作業員及び第三者への傷害	S1	F1	A1	01	1	強固なSUSケーシング使用			
		落雷	作業員への落雷	作業員の感電	S1	F1	A1	01	1	落雷予報時は屋外作業禁止			
	人的要因	作業員の施工ミス	発電機の破損・故障によるシステム停電	システムダウン 配電蓄電停止	S1	F1	A1	01	1				作業員、検査員、管理員教育
			床、道路等、ガス等のインフラ設備の損傷	漏電、停電、火災、漏水等第三者への影響	S1	F1	A1	01	1	関係会社と事前確認			
		施工マニュアル	不備あり	作業員及び第三者への傷害	S1	F1	A1	01	1	マニュアル見直し修正			
運用時	設備	発電機	設備の火災	作業員の火傷、負傷	S2	F1	A1	01	2				不燃材、難燃材の採用
			発電機の破損	作業員及び使用者・第三者の負傷	S1	F1	A1	01	1	発電機異常発生時の緊急停止			適切な点検と保守の実施
			油圧装置等からの油の流出	環境汚染	S1	F1	A1	01	1	油圧装置を使用しない仕組み			適切な点検と保守の実施
		送電・変電・蓄電設備	送電ケーブルの劣化による漏電	作業員及び使用者・第三者の感電	S1	F1	A2	01	1				適切な点検と保守の実施

		点検と保守の実施	点検および保守を実施しない	不具合に起因する使用者・第三者の負傷	S1	F1	A1	01	1				適切な点検と保守の実施
		経年劣化	耐用年数を超えるユニットや部品からの発火等	使用者・第三者の負傷	S2	F1	A1	01	1				適切な点検と保守の実施
	事前リスク回避	EMC（電磁両立性）	電磁波の発生と、外部の電磁波による影響	ペースメーカ等への悪影響あるいは、本体システム異常による使用者・第三者の負傷	S1	F1	A1	01	1	EMC 指令（EMC Directives 2004/108/EC）への適合			
		使用するユニットや部品の信頼性が低い	想定した寿命よりも早く劣化が進む	ユニットや部品からの発火により使用者・第三者の負傷	S1	F1	A1	01	1				サプライヤーは全て ISO-9001 準拠
		床面がすべりやすい	使用者の転倒	使用者の負傷	S1	F2	A2	02	1	表面材として、すべりにくい材料を使用、晴れでも雨でも安全性を確保			
		火災安全仕様	BS 7188:1998 等に準拠										
		火災安全材料仕様	SUS,銅等不燃材を使用										
	環境要因	落雷	設備の火災	作業員及び第三者の負傷	S1	F1	A1	01	1				
			停電による発電制御システムの故障		S1	F1	A1	01	1				
		高波	設備の崩壊		S1	F1	A1	01	1				
		台風	発電機の破損・故障による影響		S1	F1	A1	01	1				
		地震	発電機の破損・故障による影響		S1	F1	A1	01	1				
	人的要因	管理者の運用ミス	管理・制御システムの故障	作業員及び第三者の負傷	S1	F1	A1	01	1				
		取扱説明書	無し	不適切な使用 不適切な保守点検	S1	F1	A1	01	1		事前手配徹底		
撤去時	設備	取り扱いミス	発電機の破損・故障による影響	作業員及び第三者の負傷	S1	F1	A1	01	1				
		補助器具の不良	発電機の落下	作業員及び第三者の負傷	S1	F1	A2	01	1	軽量化を図る			
	環境要因	天候起因	発電機の破損・故障による影響		S1	F1	A1	01	1	悪天候時には作業を実施しない			
	人的要因	作業員の作業ミス	設備の崩壊	作業員及び第三者の負傷	S1	F1	A1	01	1				作業員、検査員、管理員教育
	設置場所	作業箇所及び周辺への安全防護柵等安全対策（滑り、つまづき、落下等の危険源及び複合要因を含む）	不適切な入場規制等	作業員及び第三者の負傷	S1	F1	A2	01	1		柵による作業場所の分離 関係者外立入禁止の設定		

設備要因において考慮する対象：発電機／固定設備／送電･蓄電設備　等の設備構造自体に由来するハザード（発電機の熱放射、自損など）　他
環境要因において考慮する対象：マクロ環境（社会的環境／地理的環境（自然災害など含む）／生態学的環境）、ミクロ環境（システムの設置環境／作業環境）　他
人的要因において考慮する対象：ヒューマンエラー　他

参考文献

1 章

[1-1] 「小型発電設備規制検討ワーキンググループ報告書」（平成 22 年, 経済産業省）

[1-2] Certification of Ocean Energy Converters: Tidal and Wave Energy Converters（GL、2008）

[1-3] DNV RP-A203 Technology Qualification（2013, DNV）

[1-4] ISO/TR 14121-2

[1-5] Allen Bradley 社
（http://www.ab.com/en/epub/catalogs/3377539/5866177/3378076/7565826/SISTEMA-Software-PL-Calculation-Tool.html）

[1-6] 中央労働災害防止協会
（http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei14/dl/100524-1.pdf）

[1-7] 日本機械工業連合会ガイドライン
（http://www.jmf.or.jp/japanese/standard/pdf/hyojun_guideline.pdf）

2 章

[2-1] An International Vision for Ocean Energy（IEA-OES 資料）

[2-2] Marine Scotland（http://www.scotland.gov.uk/Topics/marine/marineenergy）

[2-3] A GLOBAL WAVE ENERGY RESOURCE ASSESSMENT（Andrew M. Cornett, 2008）

[2-4] 海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務（2011、NEDO）

[2-5] EMEC（http://www.emec.org.uk/）

[2-6] Wave and Tidal Energy in the UK （2011, Renewable UK）

[2-7] IEA, World Energy Outlook 2013

[2-8] NEDO 再生可能エネルギー技術白書（2013, NEDO）

[2-9] Hammerfest Strom 社（http://www.hammerfeststrom.com/）

[2-10] Scotrenewables Tidal Power 社（http://www.scotrenewables.com/）

[2-11] Ocean Energy: Global Technology Development Status（2009, IEA-OES）

[2-12] 緑星社（http://www.ryokuseisha.com/）

[2-13] 三井造船技法 No.210（2013、三井造船株式会社）

[2-14] NEDO 海外レポート No.1044（2009、NEDO）

[2-15] 海洋資源利用に関する調査（2006、（独）海上技術安全研究所）

[2-16] Wave Dragon ApS（http://www.wavedragon.net/）

[2-17] 海洋エネルギー発電技術に関する情報収集・分析（2012、NEDO）

[2-18] 平成 25 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会資料（2013、NEDO）

[2-19] 平成 23 年度 海洋発電システムの標準化に関する調査研究報告書（2011、一般財団

法人エンジニアリング協会）
[2-20] IEC TC114
（http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0::::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1316,25）
[2-21] MARINE SCOTLAND LICENSING AND CONSENTS MANUAL（Draft）”（2012, Marine Scotland）
[2-22] EMEC Scale site consenting Process Guidance for Developers（August 2012, EMEC）
[2-23] Certification and Standards for Wind Turbines（2013, GL WindEnergie）,
[2-24] DNV RP-A203 Technology Qualification（2013, DNV）
[2-25] Certification of Tidal and Wave Energy Converters（2012, DNV）
[2-26] Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines（2005, GL）
[2-27] Guidelines on design and operation of wave energy converters（2005, DNV）
[2-28] Guidelines for Design Basis of Marine Energy Conversion Systems（2009, EMEC）
[2-29] RenewableEnergyWorld.com
（http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2013/10/u-s-tidal-energy-project-could-be-derailed-by-lack-of-proximity-standard）
[2-30] BOEMRE（http://www.boemre.gov/）
[2-31] Assessment of Offshore Wind System Design, Safety, and Operation Standards,（NREL、2014 年 1 月）
（http://usmodcore.com/files/AWS-NREL_OffshoreStandardsReport_January2014.pdf）
[2-32] DNV is appointed as CVA for Cape Wind
http://www.dnv.com/press_area/press_releases/2011/dnvisappointedascvaforcapewind.asp
[2-33] MEMORANDUM OF AGREEMENT BETWEEN THE BUREAU OF OCEAN ENERGY MANAGEMENT, REGULATION AND ENFORCEMENT — U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR AND THE U.S. COAST GUARD — U.S. DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY（July 2011）
[2-34] 国土交通省発表資料（2012） http://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_fr6_000006.html
[2-35] 洋上風力発電普及促進に向けた国土交通省の取り組み（日本風力発電協会特集、2012 年 8 月）
[2-36] 浮体式洋上風力発電施設技術基準（国土交通省海事局安全基準課）
[2-37] 国交省報道発表資料 浮体式洋上風車の普及促進について（2012 年 4 月）

3 章
[3-1] 小矢野、排熱も電気に変える熱電発電、OHM BULLTIN VOL.49 2014
[3-2] 吉野、熱電変換の基礎と応用、応用物理学会誌 82（11）（2013）
[3-3] 進藤、中谷、大石、未利用エネルギーを有効に活用する熱電発電システム、東芝レビュー Vol.63 No.2（2008）
[3-4] 株式会社東芝､未利用熱を有効活用する熱電発電システム､都市環境エネルギー 第 96 号
[3-5] 海部、梶原、藤本、牧野、八馬、熱電発電による工場排熱回収、コマツテクニカルレポート VOL 57 NO.164（2011）
[3-6] 化学工業日報､アクトリー 熱電発電システム開発 工場の低温排熱利用､2013 年 5 月 23 日 http://www.kagakukogyonippo.com/headline/2013/05/23-11367.html

[3-7]　JFE スチール株式会社、排熱を利用した熱電発電技術の実証試験を実施～排熱利用の有効性を確認～、2013 年 7 月 10 日
（http://www.jfe-steel.co.jp/release/2013/07/130710-1.html）
[3-8]　Global Termoelectric、General Documents Thermoelectric Generators
（http://www.globalte.com/products/GlobalTEGs）
[3-9]　舟橋、中村、景山、積層型酸化物熱電モジュールの発電特性とエネルギーハーベスティングデバイスへの応用、技術広報誌 metamoriphosis 16 号
（http://www.murata.co.jp/corporate/ad/article/metamorphosis16/paper/02/index.html）
[3-10]　河本洋、排熱回収用高効率熱電発電材料の研究開発動向、科学技術動向 9 月 No.90、http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt090j/index.html

4 章
[4-1]　武藤、小林、林、人の歩行で電気を生み出す床発電システム、OHM 2010 12
[4-2]　武藤、小林、林、圧電素子を駆使した「床発電システム」の開発、超音波テクノ 2010 年 4 月号
[4-3]　武藤、小林、林、床発電システム開発の取り組み、静電気学会誌 38.5（2011）
[4-4]　武藤、エネルギーハーベスティング（床発電と温度差発電）、応用物理 第 82 巻 第 11 号（2013）
[4-5]　発電タイル ペーブジェンのご紹介、株式会社アサボウ
[4-6]　Pagegen System Technology（http://www.pavegen.com/technology）
[4-7]　Pagegen System CE Testing and Compliance
（http://pavegen.com/ce-testing-and-compliance）
[4-8]　上海万博　中国人記者が伝える日本館の魅力
（http://shanghai.10s-china.com/cat57/post_436.html）
[4-9]　踏んだら、発電。日本初上陸の床発電システム「ペーブジェン」　「エコプロダクツ 2013」に出展（http://www.atpress.ne.jp/view/41500）
[4-10]　楽天×ヴィッセル神戸 エコプロジェクト の活動について
（http://www.vissel-kobe.co.jp/club/ecoprj/）
[4-11]　武藤、山本、床発電から温度差発電、電子情報通信学会論文誌 B Vol.J96-B No.12
[4-12]　厚生労働省「職場における腰痛予防対策指針」2013 年 6 月
（http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/youtsuushishin.html）
[4-13]　国土交通省「高齢者、障害者等の円滑な移動等に配慮した建築設計標準」2012 年 7 月（http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/barrier-free.files/guideline12.pdf）

平成 25 年度新エネルギー等導入促進基礎調査

新発電技術を用いた発電設備に係る安全性確認調査報告書

2014 年 3 月

株式会社　三菱総合研究所
TEL (03)6705-6040